



Francisco Parente Pereira Freire

Licenciado em Ciências de Engenharia e Gestão Industrial

Estudo de simulação de uma oficina de reparação automóvel do Grupo Salvador Caetano

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia e Gestão Industrial

Orientadora: Professora Doutora Ana Paula Ferreira Barroso,
Professora Auxiliar, FCT-UNL

Coorientadora: Professora Doutora Virgínia Helena Machado,
Professora Auxiliar, FCT-UNL

Júri:

Presidente: Professora Doutora Isabel Maria do Nascimento Lopes Nunes
Arguente: Professor Doutor Izunildo Fernandes Cabral
Vogal: Professora Doutora Ana Paula Ferreira Barroso



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Março, 2016

Francisco Parente Pereira Freire

Licenciado em Ciências de Engenharia e Gestão Industrial

**Estudo de simulação de uma oficina de reparação
automóvel do Grupo Salvador Caetano**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia e Gestão Industrial

Orientadora: Professora Doutora Ana Paula Ferreira Barroso, Professora Auxiliar,
Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Coorientadora: Professora Doutora Virgínia Helena Machado, Professora Auxiliar,
Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Professora Doutora Isabel Maria do Nascimento Lopes Nunes

Arguente: Professor Doutor Izunildo Fernandes Cabral

Vogal: Professora Doutora Ana Paula Ferreira Barroso

Março, 2016

Estudo de simulação de uma oficina de reparação automóvel do Grupo Salvador Caetano

Copyright © Francisco Parente Pereira Freire, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

A todos aqueles com quem cruzei caminho ao longo do meu percurso académico e que contribuíram para o meu desenvolvimento pessoal e intelectual.

À Professora Ana Paula Barroso e à Professora Virgínia Machado pelas suas disponibilidades, sugestões e revisões de texto que contribuíram para o desenvolvimento desta dissertação.

A todos os docentes da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa por todos os conhecimentos transmitidos que contribuíram para o meu desenvolvimento pessoal e profissional.

Aos funcionários da Caetano Colisão que me ajudaram a desenvolver este trabalho. Em particular, quero agradecer ao Miguel Pita e à Leonor Valente por todo o seu apoio e amizade. A toda a equipa da secção de pintura por terem acreditado no propósito do meu trabalho.

Ao companheirismo dos meus colegas. Aos meus amigos Bruno Lemos, Gonçalo Magno, Rodolfo Mota, Teresa Monteiro, Ana Taveira e André Águeda pela amizade e apoio prestados no desenvolvimento desta dissertação. Muito obrigado.

À minha mãe e aos meus irmãos por me apoiarem incondicionalmente e por acreditarem no meu sucesso académico. À Maria por me ter acompanhado nos momentos mais difíceis deste trabalho.

Ao meu pai.

Resumo

Nos dias de hoje, as organizações enfrentam cada vez mais desafios que exigem a inovação dos seus processos de modo a torná-los mais eficientes e, assim, garantirem a satisfação dos seus clientes. Portanto, é condição necessária à sua sustentabilidade a implementação do pensamento *lean* como filosofia organizacional para que ganhem vantagem competitiva num mercado altamente concorrencial e em constante evolução na procura de produtos e serviços inovadores. Através do pensamento *lean*, as organizações conseguem criar mais valor para os clientes utilizando menos recursos, pela eliminação contínua de desperdícios ao longo de toda a cadeia de valor do produto ou serviço.

O desenvolvimento da presente dissertação surge da necessidade de melhorar o desempenho da oficina de reparação automóvel Caetano Colisão, pertencente ao Grupo Salvador Caetano. Para o efeito, são abordados os fundamentos e algumas ferramentas do pensamento *lean*, como forma de detetar oportunidades de melhoria e, através da sua implementação, melhorar o desempenho da oficina. Todavia, dada a elevada variabilidade dos tempos de reparação das viaturas, a simulação surge como uma ferramenta capaz de não só descrever o comportamento dinâmico da oficina, como também de testar cenários alternativos sem interferir com o seu funcionamento atual. Após a revisão bibliográfica dos conceitos supramencionados, é descrito o processo de reparação automóvel e o desenvolvimento do modelo de simulação atual que representa o funcionamento da oficina. Validado o modelo de simulação atual, é feita a comparação de algumas medidas de desempenho entre o modelo de simulação atual e modelos de simulação alternativos, desenvolvidos com base na implementação de sugestões de melhoria. Por fim, são expostos os ganhos decorrentes da implementação das sugestões de melhoria e são abordadas algumas limitações do estudo e propostas para trabalhos futuros.

Palavras-chave: Pensamento *Lean*, Processo Produtivo, Modelo de Simulação, *software* ARENA.

Abstract

Nowadays, the organisations face increasing challenges that require the innovation of their processes in order to make them more efficient, and thus ensuring their clients requirements'. Therefore, it is a necessary condition for their sustainability the implementation of lean thinking as an organisational philosophy to gain competitive advantage in a highly competitive market place and in constant evolution on demanding innovative products and services. Through lean thinking the organisations are able to create more value to their clients using less resources, achieved by the continuous waste elimination along the whole value stream of the product or service.

The development of this dissertation arises from the need to improve the performance of Caetano Colisão, auto repair workshop belonging to the Grupo Salvador Caetano. To this end, the fundamentals and some tools of lean thinking are addressed as a way to identify improvement opportunities, and through its implementation improve the performance of the workshop. However, given the high variability of the car repair times, the simulation comes as a tool to not only describe the dynamic behaviour of the workshop, but also to test alternative scenarios without interfering with the current operation. After the bibliographic review of the above concepts, the auto repair process is described as the development of the simulation model that mimics the current operation of the workshop. Once the model is validated, some performance measurements are compared between the current simulation model and the alternative simulation models, which developments are based on the implementation of improvement suggestions. Finally, the gains from the implementation of the improvement suggestions are displayed, and some limitations in the study and proposals for future works are addressed.

Keywords: Lean thinking, Manufacturing Process, Simulation Model, ARENA software

Índice de Matérias

1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. Objetivos.....	2
1.3. Metodologia	2
1.4. Estrutura da dissertação.....	4
2. Pensamento <i>lean</i> e simulação	7
2.1. Pensamento <i>lean</i>	7
2.1.1. Origem e definição	7
2.1.2. <i>Lean House</i>	9
2.1.3. Princípios e desperdícios	11
2.1.4. Benefícios do pensamento <i>lean</i>	14
2.2. Algumas ferramentas do pensamento <i>lean</i>	15
2.2.1. <i>Spaghetti Diagram</i>	15
2.2.2. <i>Kaizen</i>	16
2.2.3. 5S	16
2.2.4. <i>Value Stream Mapping</i>	17
2.3. Simulação	20
2.3.1. Enquadramento	20
2.3.2. Objetivos de um estudo de simulação	22
2.3.3. Vantagens e desvantagens da simulação.....	22
2.3.4. A simulação em contextos industriais	24
2.3.5. Estudo de simulação	25
2.3.6. Análise do <i>Input</i>	29
2.3.7. Análise do <i>Output</i>	34
2.4. Síntese do capítulo.....	39
3. Caraterização do caso de estudo.....	41
3.1. Apresentação do Grupo Salvador Caetano	41
3.1.1. <i>Sub-holdings</i> do Grupo Salvador Caetano.....	41
3.2. Entrada em produção	42
3.2.1. Peritagem	43
3.2.2. Orçamentação	43
3.2.3. Processo da viatura.....	44
3.2.4. Planeamento	45
3.3. Caraterização do sistema em estudo: oficina Caetano Colisão.....	46
3.3.1. Caetano Retail: Complexo de Rio de Mouro.....	46

3.3.2. Oficina Caetano Colisão.....	47
3.3.3. Descrição do processo produtivo	51
3.4. Síntese do capítulo.....	53
4. Desenvolvimento do modelo de simulação.....	55
4.1. Modelação estrutural	55
4.1.1. Pressupostos a considerar no modelo de simulação.....	55
4.1.2. Desenvolvimento do modelo estrutural	56
4.1.3. Entidades e recursos	57
4.2. Modelação quantitativa.....	60
4.2.1. Processo de chegadas	60
4.2.2. Fase de Desmontagem de duração média	62
4.2.3. Fase de Desmontagem de duração longa	65
4.2.4. Fase de Preparação de Pintura	65
4.2.5. Fase de Pintura	67
4.2.6. Fase de Montagem.....	70
4.2.7. Acabamento	71
4.2.8. Lavagem	73
4.2.9. Controlo	74
4.3. Distribuições de probabilidade utilizadas	75
4.4. Síntese do capítulo.....	75
5. Estudo de simulação e outras propostas de melhoria	77
5.1. Modelo atual	77
5.1.1. Parâmetros da simulação.....	77
5.1.2. Validação do modelo de simulação.....	80
5.1.3. Análise do modelo atual	83
5.2. Modelo A	85
5.2.1. Sugestão de melhoria.....	85
5.2.2. Desenvolvimento do modelo A.....	86
5.2.3. Comparação do modelo atual com o modelo A	89
5.3. Modelo B	94
5.3.1. Identificação do estrangulamento do processo.....	94
5.3.2. Análise do modelo B.....	96
5.3.3. Comparação do modelo atual com o modelo B	98
5.4. Síntese do capítulo.....	101
6. Conclusões.....	103
6.1. Análise dos resultados obtidos.....	103
6.2. Outras propostas de melhoria	106

6.3. Limitações do estudo e propostas para trabalhos futuros	107
Referências bibliográficas.....	105
Anexos.....	115
A. Pensamento <i>lean</i> e simulação.....	115
A.1. <i>Value Stream Mapping</i>	115
A.2. Diagrama de dispersão.....	118
A.3. Histograma.....	119
A.4. Divisão do conjunto de dados.....	121
A.5. Distribuições de probabilidade.....	121
A.6. Processo de <i>Poisson</i>	123
A.7. Ausência de dados.....	124
A.8. <i>Input Analyzer</i>	125
A.9. <i>Output Analyzer</i>	129
A.10. <i>Mann-Whitney U Test</i>	131
A.11. <i>Process Analyzer</i>	131
B. Desenvolvimento do modelo de simulação.....	133
B.1. Chegadas.....	133
B.2. Desmontagem de duração média.....	134
B.3. Desmontagem de duração longa.....	135
B.4. Preparação de Pintura.....	139
B.5. Pintura.....	142
B.6. Montagem.....	146
C. Estudo de simulação e outras propostas de melhoria.....	151
C.1. Parâmetros da simulação.....	151
C.2. Validação do modelo de simulação.....	152
C.3. Modelo A.....	153
C.4. Modelo B.....	157

Índice de Figuras

Figura 2.1 – Lean House.	10
Figura 2.2 – Os cinco princípios do pensamento lean.	12
Figura 2.3 – Exemplo de um Spaghetti Diagram.	16
Figura 2.4 – Aplicação do VSM.	18
Figura 2.5 – Estudo de um sistema.	21
Figura 2.6 – Classificação dos modelos de simulação.	26
Figura 2.7 – Metodologia de um estudo de simulação.	27
Figura 3.1 – Organização da Salvador Caetano Auto.	42
Figura 3.2 – Fluxograma Peritagem e Orçamentação.	45
Figura 3.3 – Layout da oficina Caetano Colisão no piso -1.	50
Figura 3.4 – Fluxograma do processo produtivo.	51
Figura 4.1- Modelo estrutural no software ARENA.	56
Figura 4.2 – Definição da entidade.	58
Figura 4.3 – Sets de recursos.	58
Figura 4.4 – Recursos do modelo de simulação.	59
Figura 4.5 – Ajustamento do número diários de entradas de viaturas à distribuição de Poisson.	60
Figura 4.6 – Módulo Create.	61
Figura 4.7 – Diagrama de dispersão da fase de Desmontagem de duração média.	62
Figura 4.8 – Histograma dos tempos de processamento da fase de Desmontagem de duração média.	63
Figura 4.9 – Ajustamento dos tempos de processamento da fase de Desmontagem de duração média à distribuição Gamma.	63
Figura 4.10 – Módulo process “Desmontagem media”.	64
Figura 4.11 – Módulo process “Desmontagem Longa”.	65
Figura 4.12 – Módulo process “Preparacao Pintura”.	66
Figura 4.13 – Módulo process “RE Preparacao Pintura”.	67
Figura 4.14 – Módulo process “Pintor”.	68
Figura 4.15 – Módulo process “RE Pintor”.	69
Figura 4.16 – Módulo process “Estufa”.	69
Figura 4.17 – Módulo process “RE Estufa”.	70
Figura 4.18 – Módulo process “Montagem”.	71
Figura 4.19 – Módulo process “Acabamento”.	72
Figura 4.20 – Módulo process “RE Acabamento”.	73
Figura 4.21 – Módulo process “Lavagem”.	74
Figura 4.22 – Módulo process “Controlo”.	74
Figura 5.1 – Run Setup do modelo atual sem período de warm-up.	77
Figura 5.2 – Período de warm-up para o modelo atual.	78
Figura 5.3 – Run Setup do modelo atual com o período de warm-up.	79
Figura 5.4 – Número de viaturas reparadas mensalmente na oficina e no modelo.	81
Figura 5.5 – Modelo A.	87
Figura 5.6 – Intervalo para 95% de confiança entre a diferença dos valores médios do tempo de valor não acrescentado no modelo atual e no modelo A.	91
Figura A.1 – Simbologia do VSM.	113
Figura A.2 – Etapa 1 na construção do VSM.	113
Figura A.3 – Etapa 2 na construção do VSM.	114
Figura A.4 – Etapa 3 na construção do VSM.	114
Figura A.5 – Etapa 4 na construção do VSM.	115
Figura A.6 – Etapa 5 na construção do VSM.	115
Figura A.7 – Etapa 6 na construção do VSM.	116
Figura A.8 – Exemplo de um gráfico de dispersão de dados não correlacionados.	117
Figura A.9 – Exemplo de um gráfico de dispersão de dados correlacionados positivamente.	117
Figura A.10 – Exemplo de um histograma de 14 classes.	118
Figura A.11 – Exemplo de um histograma de 8 classes.	119
Figura A.12 – Distribuição uniforme.	122

Figura A.13 – Distribuição triangular.....	123
Figura A.14 – Ajustamento de uma distribuição de probabilidade teórica a um histograma.....	124
Figura A.15 – Sumário estatístico do ajustamento dos dados a uma distribuição de probabilidade teórica.....	124
Figura A.16 – Sumários dos erros quadráticos médios dos dados em relação às distribuições de probabilidade.....	125
Figura A.17 – Gráfico de uma distribuição empírica.....	125
Figura A.18 – Expressão de uma distribuição empírica.....	126
Figura A.19 – Testes paramétricos do <i>Output Analyzer</i>	127
Figura A.20 – Exemplo de comparação de médias através do <i>Output Analyzer</i>	127
Figura A.21 – Exemplo da evolução temporal do WIP para determinar o período de <i>warm-up</i>	128
Figura A.22 – Exemplo do <i>Process Analyzer</i>	129
Figura B.1 - Histograma do número diário de entradas diárias de viaturas.....	132
Figura B.2 - Diagrama de dispersão dos tempos de processamento da fase de Desmontagem de duração longa.....	134
Figura B.3 – Histograma dos tempos de processamento da fase Desmontagem de duração longa.....	135
Figura B.4 – Ajustamento dos tempos de processamento da fase de Desmontagem de duração longa à distribuição exponencial.....	136
Figura B.5 – Diagrama de dispersão dos tempos de processamento da Preparação de Pintura.....	137
Figura B.6 – Histograma dos tempos de processamento da fase de Preparação de Pintura.....	139
Figura B.7 – Ajustamento dos tempos de processamento da fase de Preparação de Pintura à distribuição Weibull.....	140
Figura B.8 – Diagrama de dispersão dos tempos de permanência das viaturas em estufa da fase de Pintura.....	141
Figura B.9 – Ajustamento dos tempos de permanência nas estufas da fase de Pintura.....	142
Figura B.10 – Diagrama de dispersão dos tempos de processamento da Pintura.....	143
Figura B.11 – Histograma dos tempos de processamento da Montagem.....	144
Figura B.12 – Ajustamento dos tempos de processamento da Montagem.....	146
Figura B.13 – Distribuição empírica dos tempos de processamento da Montagem.....	147
Figura B.14 – Parâmetros da distribuição empírica.....	148
Figura B.15 – Parâmetros da distribuição empírica.....	148
Figura C.1 – <i>Data Module Statistic</i> para o registo dos valores do WIP ao longo do tempo de simulação nas 10 replicações.....	149
Figura C.2 – Opção <i>Plot</i> do <i>Output Analyzer</i>	149
Figura C.3 – Evolução temporal do WIP no modelo A.....	152
Figura C.4 – Tempo de valor não acrescentado para o modelo atual no <i>Statistic</i>	154
Figura C.5 – Opção <i>Compare Means</i> do <i>Output Analyzer</i>	154
Figura C.6 – Intervalo para 95% de confiança entre a diferença dos valores médios do tempo de valor acrescentado no modelo atual e no A.....	155
Figura C.7 – Intervalo para 95% de confiança entre a diferença dos valores médios do tempo na fila de espera no modelo atual e no A.....	155
Figura C.8 – Intervalo para 95% de confiança entre a diferença dos valores médios do tempo de permanência no modelo atual e no A.....	155
Figura C.9 – Evolução temporal do WIP no modelo B.....	156
Figura C.10 – Intervalo para 95% de confiança da diferença entre os valores médios do número de viaturas na fila de espera para a fase de Desmontagem de duração longa no modelo atual e no modelo B.....	158
Figura C.11 – Intervalo para 95% de confiança da diferença entre os valores médios do tempo na fila de espera de uma viatura para a fase de Desmontagem de duração longa no modelo atual e no modelo B.....	158

Figura C.12 – Intervalo para 95% de confiança da diferença entre os valores médios do número de viaturas na fila de espera para a fase de Desmontagem de duração média no modelo atual e no modelo B.....	158
Figura C.13 – Intervalo para 95% de confiança da diferença entre os valores médios do tempo na fila de espera de uma viatura para a fase de Desmontagem de duração média no modelo atual e no modelo B.....	159
Figura C.14 – Intervalo para 95% de confiança da diferença entre os valores médios do número de viaturas na fila de espera para a fase de Montagem no modelo atual e no modelo B.....	159
Figura C.15 – Intervalo para 95% de confiança da diferença entre os valores médios do tempo na fila de espera de uma viatura para a fase de Montagem no modelo atual e no modelo B.....	159
Figura C.16 – Intervalo para 95% de confiança entre a diferença dos valores médios do número de viaturas que saíram da oficina no modelo atual e no modelo B.....	159
Figura C.17 – Intervalo para 95% de confiança da diferença entre os valores médios do tempo de valor acrescentado no modelo atual e no modelo B.....	160
Figura C.18 – Intervalo para 95% de confiança da diferença entre os valores médios do tempo de valor não acrescentado no modelo atual e no modelo B.....	160
Figura C.19 - Intervalo para 95% de confiança da diferença entre os valores médios do tempo de espera no modelo atual e no modelo B.....	160
Figura C.20 - Intervalo para 95% de confiança da diferença entre os valores médios do tempo de permanência no modelo atual e no modelo B.....	161

Índice de Tabelas

Tabela 1.1 – Planeamento de atividades.....	4
Tabela 2.1 – Áreas de aplicação da simulação.....	25
Tabela 2.2 – Dados de cada replicação e entre replicações.....	34
Tabela 3.1 – Número de técnicos e capacidade em horas da oficina.....	48
Tabela 3.2 – Fases sequenciais do processo.....	49
Tabela 3.3 – Legenda do layout da oficina.....	50
Tabela 4.1 – Informações relativas à modelação do intervalo de tempo entre chegadas de viaturas ao modelo.....	61
Tabela 4.2 – Informações relativas à modelação do tempo de processamento da fase de Desmontagem de duração média.....	64
Tabela 4.3 – Distribuições de probabilidade utilizadas na modelação das fases do processo.....	75
Tabela 5.1 – Sumário estatístico de dez replicações para a medida de desempenho WIP.....	79
Tabela 5.2 – Cálculo do número de replicações no modelo atual.....	80
Tabela 5.3 – Ranks dos valores do número de viaturas reparadas na oficina e no modelo.....	82
Tabela 5.4 – Valores de decisão para o Mann-Whitney U Test.....	83
Tabela 5.5 – Medidas de desempenho no modelo atual.....	84
Tabela 5.6 – Medidas de desempenho no modelo A.....	88
Tabela 5.7 – Indicadores do modelo atual e do modelo A.....	88
Tabela 5.8 – Desvio percentual das médias das medidas de desempenho no modelo A em relação ao modelo atual.....	89
Tabela 5.9 – Intervalos para 95% de confiança para as diferenças dos valores médios das medidas de desempenho no modelo atual e no modelo A.....	92
Tabela 5.10 – Tempos nas filas de espera nas fases do processo no modelo atual.....	95
Tabela 5.11 – Valores dos fatores no modelo atual e no modelo B.....	96
Tabela 5.12 – Valores dos indicadores no modelo atual e no modelo B.....	97
Tabela 5.13 – Intervalo para 95% de confiança para a diferença dos valores médios das medidas de desempenho no modelo atual e no modelo B.....	98
Tabela 6.1 – Ganhos nas medidas de desempenho que resultam da implementação do modelo A.....	104
Tabela 6.2 – Ganhos nas medidas de desempenho que resultam da implementação do modelo B.....	105
Tabela A.1 – Distribuições de probabilidade teóricas contínuas.....	120
Tabela B.1 – Parâmetros necessários à construção do histograma do número de entradas de viaturas em oficina.....	131
Tabela B.2 – Dados do histograma para o número diário de entradas de viaturas em oficina.....	131
Tabela B.3 – Parâmetros necessários à construção do histograma dos tempos de processamento da fase Desmontagem de duração média.....	132
Tabela B.4 – Dados necessários à construção do histograma dos tempos da fase de Desmontagem duração média.....	133
Tabela B.5 – Sumário dos erros quadráticos do ajustamento de várias distribuições aos tempos de processamento da fase de Desmontagem de duração média.....	133
Tabela B.6 – Parâmetros necessários à construção do histograma para os tempos de processamento das viaturas na fase Desmontagem de duração.....	134
Tabela B.7 – Dados do histograma para os tempos de processamento das viaturas na fase de Desmontagem de duração longa.....	135
Tabela B.8 – Sumário dos erros quadráticos do ajustamento de várias distribuições aos tempos de processamento da fase de Desmontagem de duração longa.....	136
Tabela B.9 – Informações relativas à modelação do tempo de processamento das viaturas na fase de Desmontagem de duração longa.....	137
Tabela B.10 – Parâmetros necessários à construção do histograma para os tempos de processamento das viaturas na fase de Preparação de Pintura.....	138
Tabela B.11 – Dados do histograma para os tempos de processamento das viaturas na fase Preparação de Pintura.....	138
Tabela B.12 – Sumário dos erros quadráticos do ajustamento de várias distribuições em relação aos tempos de processamento das viaturas na fase de Preparação de Pintura.....	139

Tabela B.13 – Informações relativas à modelação do tempo de processamento das viaturas na fase de Preparação de Pintura.....	140
Tabela B.14 – Parâmetros necessários à construção do histograma para os tempos de permanência das viaturas nas estufas na fase de Pintura.....	141
Tabela B.15 – Dados do histograma para os tempos de permanência das viaturas nas estufas na fase de Pintura.....	142
Tabela B.16 – Sumário dos erros quadráticos dos ajustamentos de várias distribuições aos tempos de permanência das viaturas nas estufas na fase de Pintura.....	143
Tabela B.17 – Informações relativas à modelação dos tempos de permanência das viaturas nas estufas na fase de Pintura.....	144
Tabela B.18 – Parâmetros necessários à construção do histograma para os tempos de processamento das viaturas na fase de Montagem.....	145
Tabela B.19 – Dados do histograma para os tempos de processamento das viaturas na fase de Montagem.....	145
Tabela B.20 – Sumário dos erros quadráticos do ajustamento de várias distribuições em relação aos tempos de processamento das viaturas na fase de Montagem.....	146
Tabela B.21 – Informações relativas à modelação dos tempos de processamento das viaturas na fase de Montagem.....	147
Tabela C.1 – Valores médios do WIP para cada replicação no modelo atual.....	150
Tabela C.2 – Número de viaturas reparadas mensalmente na oficina e no modelo atual.....	150
Tabela C.3 – Valores médios do WIP para cada replicação no modelo A.....	152
Tabela C.4 – Sumário estatístico de dez replicações para a medida de desempenho WIP no modelo A.....	153
Tabela C.5 – Cálculo do número de replicações.....	153
Tabela C.6 – Valores médios do WIP para cada replicação no modelo B.....	156
Tabela C.7 – Sumário estatístico de dez replicações para a medida de desempenho WIP no modelo B.....	157
Tabela C.8 – Cálculo do número de replicações.....	157

Lista de abreviaturas

CSM – *Current State Map*

DES – *Discrete Event Simulation*

FSM – *Future State Map*

GSC – Grupo Salvador Caetano

h – *half width*

IID – Independentes e Identicamente Distribuídos

JIT – *Just in Time*

LL – Linha Longa

LR – Linha Rápida

PAN – Processo *Analyzer*

PL – Pensamento *lean*

R – Número de replicações

RE – Retrabalho

S – Desvio amostral

SA – Sociedade Anónima

SGPS – Sociedade Gestora de Participações Sociais

TMC – *Toyota Motor Company*

TPS – *Toyota Production System*

VSM – *Value Stream Mapping*

WIP – *Work in Progress*

α – Nível de significância

μ – Valor médio

1. Introdução

A presente dissertação resulta do desenvolvimento de um caso de estudo na oficina de reparação automóvel Caetano Colisão, pertencente ao Grupo Salvador Caetano (GSC).

O presente capítulo inclui o enquadramento da dissertação, os objetivos a atingir, a metodologia utilizada para ir ao encontro dos objetivos delineados e, por fim, a estrutura da dissertação.

1.1. Enquadramento

Atualmente, a sobrevivência de uma organização depende da gestão eficiente dos seus recursos e da capacidade em responder rapidamente às alterações impostas pelo mercado. Como tal, deve procurar a melhoria contínua dos seus processos para fazer frente a estas alterações e aumentar a sua quota de mercado face aos seus concorrentes. Neste contexto, surge o pensamento *lean* como uma filosofia organizacional que procura aumentar constantemente o valor do produto ou serviço prestado ao cliente, através da redução e eliminação de desperdícios ao longo da cadeia de valor. Esta filosofia tem como principal crença que o sucesso de uma organização depende dos seus trabalhadores e que apenas uma pequena fração do tempo e esforço para a conceção do produto ou serviço acrescenta valor para o cliente. Como tal, é necessário o desenvolvimento de uma cultura de melhoria contínua dentro de uma organização que vise a partilha de conhecimentos, experiências e sugestões por parte dos seus trabalhadores. Uma organização com trabalhadores que se sintam respeitados e motivados é capaz melhorar o seu desempenho a um nível excecional. Para tal, é fundamental o apoio da gestão da organização como forma de motivar os seus trabalhadores a alterarem os seus hábitos de trabalho e encorajar um espírito de melhoria contínua.

Contudo, a própria gestão da organização é, muitas vezes, incapaz de acompanhar a implementação desta filosofia, seja por acreditar que o pensamento *lean* é apenas uma caixa de ferramentas, seja pela falta de visibilidade no processo. Assim, a simulação revela-se como uma ferramenta poderosa como forma de modelar o processo, permitindo à gestão da organização ganhar uma maior visibilidade, identificar oportunidades de melhoria e experimentar cenários alternativos sem interferir com o funcionamento do processo.

Por conseguinte, a simulação revela-se uma ferramenta essencial na tomada de decisão, pois não só permite aumentar a visibilidade do processo em estudo, como ainda testá-lo sob diversas condições de modo a avaliar o seu desempenho. Além do mais, esta ferramenta tem como principal vantagem manipular o sistema sem interferir no seu funcionamento, permitindo experimentá-lo em modo *offline*. Contudo, esta ferramenta enfrenta como principal limitação o ceticismo da gestão das organizações, já que os *softwares* para o efeito são dispendiosos e os resultados nem sempre são de fácil interpretação.

A presente dissertação consiste no desenvolvimento de um caso de estudo junto da Caetano Colisão, oficina de reparação automóvel, em que as viaturas passam por diferentes postos de trabalhos onde são aplicadas diferentes tecnologias para concluir o processo de reparação. Portanto, para uma melhoria do processo, deve ser promovido um fluxo contínuo dos materiais e informação a que uma

viatura está sujeita ao longo do processo de reparação, garantindo a sua eficiência e eficácia. Pretende-se, com esta dissertação, demonstrar que a melhoria do processo segundo uma perspetiva do pensamento *lean* é algo crucial para a satisfação dos clientes e que, através da simulação, é possível dar a conhecer à gestão da organização o atual funcionamento do processo de reparação e quantificar os ganhos resultantes da implementação das sugestões de melhoria.

1.2. Objetivos

A presente dissertação tem como principal objetivo aumentar a eficácia do processo através da redução do número de inconformidades associadas a trabalhos de pintura e, conseqüentemente, a eficiência do processo através da redução dos tempos médios de valor não acrescentado a que uma viatura está sujeita ao longo do processo de reparação. As medidas de desempenho de interesse são i) tempo médio de valor não acrescentado de uma viatura (tempo médio associado a retrabalhos de pintura), ii) tempo médio de espera de uma viatura, iii) tempo médio de permanência de uma viatura na oficina e iv) número médio de viaturas reparadas mensalmente. Para o cumprimento do objetivo, são desenvolvidos três modelos de simulação:

1. O modelo atual que representa o funcionamento atual da oficina;
2. O modelo A que corresponde a um modelo de simulação alternativo que visa a melhoria de algumas medidas de desempenho, nomeadamente, do tempo médio de valor não acrescentado de uma viatura (tempo médio associado a retrabalhos de pintura), do tempo médio de espera de uma viatura e, conseqüentemente, do tempo médio de permanência de uma viatura na oficina e do número de viaturas reparadas mensalmente;
3. O modelo B que corresponde ao modelo atual com a variante de que é acrescentado um técnico à equipa de secção de chapa, já que as fases do processo desempenhada por esta equipa representam o estrangulamento do processo (*bottleneck*). Como tal, o modelo B corresponde a um modelo de simulação alternativo que visa a redução dos tempos médios de espera associados ao estrangulamento do processo, bem como, o aumento do número médio de viaturas reparadas mensalmente.

1.3. Metodologia

A presente dissertação incide no estudo do processo produtivo na oficina de reparação automóvel Caetano Colisão. O estudo inicia-se com uma revisão bibliográfica dos fundamentos e conceitos do pensamento *lean* e de algumas ferramentas que lhe estão associadas. Da mesma forma, é feita uma revisão bibliográfica dos fundamentos e conceitos no que à simulação toca, nomeadamente, são descritos os vários tipos de modelos de simulação, as vantagens e desvantagens decorrentes de um estudo desta natureza, os passos a adotar e, por fim, a descrição da metodologia do processo de recolha e tratamento estatístico dos dados. Seguidamente, são descritas as várias fases do processo em estudo, é desenvolvido um modelo de simulação e são testados modelos alternativos para quantificar os ganhos obtidos pela implementação de algumas sugestões de melhoria, recorrendo ao

software ARENA. Por fim, são tecidas algumas conclusões e limitações do estudo desenvolvido, como também propostas de trabalhos futuros.

O objetivo primordial desta dissertação era redução do tempo médio de permanência de uma viatura em oficina, através da implementação de algumas ferramentas do pensamento *lean*. Face a esta possibilidade, a gestão da organização pediu que fossem recolhidos os tempos de processamento nas duas secções produtivas de pintura e de chapa durante um mês de observação. A recolha dos tempos consistia em registar as horas de entrada e de saída das viaturas em reparação nos vários postos de trabalho e, a partir deste registo, calcular o tempo de processamento.

Durante este período foi possível analisar cada fase do processo, o que permitiu a familiarização com o fluxo produtivo. À medida que foi sendo feita a recolha dos dados, verificou-se a existência de uma elevada variabilidade nos tempos de processamento das várias fases do processo. Decidiu-se, então, que para efeitos do estudo do sistema, a simulação poderia trazer benefícios para a oficina, pois permitia cumprir o objetivo delineado sem interferir com o funcionamento normal do sistema e ainda, tornar possível comparar estatisticamente diferentes configurações do sistema que fossem não apenas de encontro ao objetivo, mas que também potenciassem uma melhoria nalgumas medidas de desempenho, nomeadamente, na redução do tempo médio de valor não acrescentado de uma viatura na oficina ou do tempo médio de espera de uma viatura na oficina.

No final do período de observação, os dados relativos aos tempos de processamento de cada fase do processo foram analisados estatisticamente, como forma de servirem de *input* ao modelo de simulação. Para o efeito, foi utilizada a aplicação do *software* ARENA, o *Input Analyzer*. Esta ferramenta é eficaz na modelação do *input*, por permitir ajustar os dados a várias distribuições de probabilidade teóricas (ou mesmo a uma distribuição empírica) e fornecer um valor teste que serve de critério para avaliar a qualidade do ajustamento dos dados a uma distribuição de probabilidade teórica.

Concluída a recolha de dados, utilizou-se a aplicação *Input Analyzer* para o tratamento estatístico dos dados relativos ao período de observação e verificou-se um ajustamento adequado das várias fases do processo a uma distribuição de probabilidade. Posto isto, procedeu-se à revisão bibliográfica dos conceitos teóricos do pensamento *lean* e da ferramenta de simulação, como forma de ganhar capital intelectual para que fosse feito um estudo científico da oficina e que as conclusões geradas a partir deste estudo revelassem um elevado grau de veracidade. Em ambos os casos, recorreu-se a artigos de revistas científicas e obras literárias conceituadas sobre os temas em causa.

Uma vez estudados e descritos os vários conceitos teóricos subjacentes às duas áreas de estudo, procedeu-se ao desenvolvimento do modelo de simulação recorrendo ao *software* ARENA versão 14.00.00, desenvolvido pela *Rockwell Automation*. A escolha do *software* prendeu-se com o facto de este ser capaz de recriar fidedignamente o funcionamento da oficina, com base em pressupostos assumidos.

Verificado e validado o modelo de simulação através da comparação do *output* do modelo com dados do sistema real, procedeu-se ao desenvolvimento de modelos alternativos que foram comparados com

o modelo do sistema atual, de forma a explorar se as medidas de desempenho supramencionadas tinham melhorado.

Por fim, é feita uma análise dos resultados obtidos, são tecidas algumas sugestões de melhoria e são expostas algumas limitações do estudo, bem como, propostas para trabalhos futuros.

A Tabela 1.1 ilustra o planeamento temporal das várias atividades necessárias ao desenvolvimento da dissertação. Como é possível observar pela Tabela 1.1, o início da recolha dos tempos de processamento das várias fases do processo teve início no mês de agosto e terminou em novembro. A análise estatística dos tempos de processamento recolhidos foi feita no final de novembro. Enquanto decorria o de processo recolha, foram estudados alguns artigos de revistas científicas e foram lidas algumas obras relativas aos conceitos do pensamento *lean* e da técnica de simulação.

Tabela 1.1 – Planeamento de atividades.

	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Jan.	Fev.	Mar.
Recolha de dados								
Análise do <i>input</i>								
Revisão bibliográfica e leitura de revistas e obras científicas								
Desenvolvimento dos modelos de simulação								
Identificação de oportunidades de melhoria								
Conclusões e considerações finais								

Concluído o processo de recolha dos tempos de processamento, procedeu-se então à escrita da revisão bibliográfica dos fundamentos e conceitos quer do pensamento *lean*, quer da simulação. Posteriormente, procedeu-se ao desenvolvimento do modelo de simulação, através do qual foram desenvolvidos modelos alternativos que permitissem uma melhoria de algumas medidas de desempenho. Por fim, foram tecidas algumas conclusões e considerações acerca do caso de estudo.

1.4. Estrutura da dissertação

A presente dissertação está dividida em seis capítulos, sendo que o primeiro corresponde ao presente capítulo e que aborda o enquadramento do estudo, os objetivos a atingir, a metodologia utilizada e, por fim, a estrutura da dissertação.

O segundo capítulo corresponde à revisão bibliográfica que serve de fundamentação teórica para o trabalho desenvolvido. Neste capítulo, são expostos os conceitos inerentes ao pensamento *lean* e algumas ferramentas que lhe estão associadas, bem como, os fundamentos teóricos da ferramenta de simulação.

O terceiro capítulo diz respeito à caracterização do caso de estudo no qual é apresentado, brevemente, o Grupo Salvador Caetano no qual a oficina está inserida e é descrito o processo produtivo que será objeto de estudo da presente dissertação.

No quarto capítulo descreve-se o desenvolvimento do modelo de simulação desenvolvido no *software* ARENA, bem como os pressupostos assumidos. É, também, abordada a análise do *input* relativa às várias fases do processo e o processo de chegadas das entidades ao modelo.

O quinto capítulo consiste na determinação dos parâmetros do estudo de simulação, na validação do modelo de simulação e na análise e comparação de modelos alternativos com o modelo atual de forma a averiguar se houve uma melhoria nas medidas de desempenho em análise.

Por fim, no sexto capítulo, são expostos os ganhos obtidos pela implementação dos modelos alternativos e são sugeridas outras propostas de melhoria com base nalgumas ferramentas do pensamento *lean*. Acresce a identificação de algumas limitações do estudo e propostas para trabalhos futuros.

2. Pensamento *lean* e simulação

2.1. Pensamento *lean*

No seguinte subcapítulo, são abordados os conceitos teóricos do pensamento *lean* no que diz respeito à sua origem, aos seus princípios e desperdícios, bem como algumas das suas ferramentas.

2.1.1. Origem e definição

No início do século XX, Henri Ford apresentou ao mundo o paradigma de produção em massa para a produção de automóveis, tendo alterado os paradigmas de produção artesanal para a produção em massa (Pinto, 2008). Na era de produção em massa eram produzidos automóveis em larga escala a um preço competitivo (Melton, 2005) à custa de equipamentos dispendiosos e altamente especializados (Womack *et al.*, 1990) e de *designs* de componentes estandardizados, comprometendo, contudo, a sua flexibilidade (Bowen e Youngdahl, 1998). Na indústria automóvel era produzido um modelo de cada vez, em grandes quantidades, pois o tempo associado à reconfiguração dos equipamentos (tempo de *setup*) para a produção de um modelo diferente implicava a paragem do sistema produtivo, o que resultava num enorme prejuízo para a marca (Wilson, 2010).

Para minimizar os tempos de *setup* e, consequentemente, o custo do produto, o paradigma de produção em massa baseava-se numa filosofia de produção *push* ou *Make-to-Stock*: as organizações produziam para *stock*, “empurrando” o produto ao longo do processo produtivo, de forma a ocupar ao máximo o espaço dedicado à armazenagem (Melton, 2005), sendo o *Marketing* responsável pelo escoamento dos produtos (Anvari *et al.*, 2011).

Com o passar do tempo, o mercado tornou-se mais exigente ao requerer entregas rápidas, maior personalização, melhor qualidade dos produtos e serviços, a preços mais baixos (Pinto, 2008). Assim, a vantagem competitiva de uma organização passou a basear-se na rápida tomada de decisões, na inovação e na flexibilidade dos processos, em vez de economias de escala e acumulação de grandes volumes de *stock* (Handel, 2013).

Com o fim da segunda guerra mundial, a *Toyota Motor Company* (TMC) passou a dedicar-se à produção em larga escala de automóveis com variedades de modelos para satisfazer os vários segmentos do mercado (Womack *et al.*, 1990). Taiichi Ohno, engenheiro chefe da produção da TMC, ao analisar o paradigma de produção em massa na cultura ocidental, identificou duas grandes falhas (Holweg, 2007):

1. Produção de componentes em grandes lotes resultava em grandes volumes de *stocks* que, por sua vez, implicavam um grande investimento de capital, uma ocupação excessiva do espaço de armazenagem e um número elevado de defeitos;
2. Incapacidade em acomodar nos seus produtos as preferências dos clientes, dada a baixa flexibilidade dos processos.

Em 1946, a TMC é obrigada a dispensar dois terços dos seus trabalhadores, o que gerou descontentamento no seio da comunidade de trabalhadores. O presidente da marca, Kiichiro Toyoda, demite-se do seu cargo e são asseguradas duas condições aos trabalhadores: trabalho vitalício e aumento salarial. Ao garantir trabalho vitalício, a TMC exigia aos seus trabalhadores que participassem ativamente na promoção dos interesses da marca sugerindo oportunidades de melhoria, a fim de ganharem vantagem competitiva no mercado automóvel. Como recompensa, uma componente salarial dos trabalhadores refletia os lucros obtidos pela marca, sendo o salário também aumentado ao longo dos anos de serviço. A TMC entendeu que os seus trabalhadores eram uma mais valia para a marca e não mais um recurso a ser explorado, como no paradigma da produção em massa (Womack *et al.*, 1990).

As alterações das condições de trabalho levaram à descentralização das organizações, com hierarquias mais achatadas, com menor controlo da gestão, mas com maior participação dos trabalhadores na tomada de decisão, no controlo da qualidade e na resolução de problemas, o que permitiu ao trabalhador usar e desenvolver os seus conhecimentos e experiências. Assim, os trabalhadores sentiram-se mais realizados com o seu trabalho, potenciando o aumento do seu desempenho e concomitantemente o da organização (Handel, 2013).

Como resultado surge o *Toyota Production System* (TPS) que segundo Ohno, citado por Wilson (2010) é um sistema de produção que visa a redução do custo global através da eliminação de desperdícios, tendo como base os controlos da quantidade e da qualidade. Este sistema baseia-se na ambição de produzir num fluxo contínuo através do reconhecimento de que apenas uma pequena fração do tempo e esforço total para o processamento de um produto acrescenta valor para o cliente, bem como na identificação e consequente redução ou eliminação de desperdícios (Melton, 2005), aumentando, simultaneamente, a segurança e a moral dos seus trabalhadores (Ghinato, 2006). Por desperdício (*muda* é o termo japonês) entende-se tudo o que acrescenta custo ou tempo sem acrescentar valor ao produto ou serviço (Machado, 2007).

Através da redução de desperdícios, uma organização é capaz de encurtar o *lead time* do processo (tempo total que o cliente deve aguardar para receber o produto após o pedido (Womack e Jones, 2003)), ganhando uma maior capacidade de resposta a alterações exigidas pelos clientes e maior flexibilidade no processamento do produto, quer em termos de quantidade, quer em termos de variedade. Com *lead time* mais curtos, a organização não só melhora a qualidade na resposta às alterações do cliente, como potencia a durabilidade das relações da organização com os seus clientes e intervenientes na cadeia de abastecimento (Wilson, 2010).

As ideias subjacentes ao TPS deram lugar a uma nova filosofia organizacional, o pensamento *lean* (PL). O termo *lean* (magro) resulta da vantagem em produzir segundo esta filosofia (quando comparada com o paradigma da produção em massa) já que possibilita uma forma de produzir mais (valor para o cliente) com menos (recursos): menos esforço humano, menos equipamentos, com redução de tempo, *stocks* e espaço (Womack e Jones, 2003).

Portanto, o PL pode ser definido como uma forma de gerir compreendendo um conjunto abrangente de ferramentas que, quando combinadas, permitirão à organização reduzir ou até eliminar os vários desperdícios, conduzindo a uma maior flexibilidade e capacidade de resposta ao mercado (Wilson, 2010). Esta filosofia responde às aspirações da sociedade na procura de produtos e serviços personalizados, bem feitos, entregues rapidamente no prazo pretendido e no local solicitado, por um preço aceitável (Machado, 2007), devendo ser adotada por todos os intervenientes na organização, ou seja, desde os aspetos industriais (desenvolvimento do produto, produção, gestão dos recursos) até toda a cadeia de abastecimento (do fornecedor à entrega do produto ao cliente final) (Anvari *et al.*, 2011).

O PL evoluiu do nível operacional (âmbito da produção), onde se concentrava na redução dos desperdícios e custos de produção, para o nível estratégico, por meio de uma abordagem que visa constantemente aumentar o valor para o cliente, através da criação de novas características nos produtos ou serviços e da remoção de desperdícios ao longo de toda a cadeia de abastecimento. O resultado é a melhoria do desempenho da organização, bem como do serviço ao cliente (Hines *et al.*, 2004).

Em suma, o PL é uma forma melhor de produzir produtos ou serviços com maior diversidade, a custos mais baixos, cujos princípios podem ser aplicados quer em ambiente industrial, quer em ambiente de serviços. Uma organização que visiona incorporar técnicas inovadoras nos seus processos, poderá aplicar os princípios do PL como forma de ganhar vantagem competitiva. Esta filosofia proporciona aos trabalhadores de qualquer nível da organização (desde a fábrica à administração) desafios mais interessantes que vão de encontro à sua realização pessoal (Womack *et al.*, 1990).

2.1.2. *Lean House*

O TPS é sustentado por dois grandes pilares (Figura 2.1): o *Just in Time* (JIT) e o *Jidoka*. O *Jidoka* está para a garantia da qualidade, como o JIT está para a redução do *lead time* (Ghinato, 2006). É condição necessária à implementação e perpetuação destas técnicas trabalhadores altamente qualificados, já que estes são o maior valor que uma organização pode ter (Liker e Meier, 2006), pelo que faz sentido que sejam o cerne da *Lean House*.

O JIT é uma técnica que visa não só a produção e entrega correta de produtos, no tempo e nas quantidades certas (Wilson, 2010), como também a diminuição no volume de *stocks*, reduzindo, consequentemente, os custos associados à sua posse (Mehri, 2006) e expondo problemas que poderão ser resolvidos pelos trabalhadores da organização (Liker e Meier, 2006). É, portanto, uma técnica de controlo da quantidade que tem como elementos chave (Womack e Jones, 2003):

- Fluxo contínuo (de materiais e informação): fluxo ininterrupto de produtos e informação ao longo de todo o processo, desde o seu *design* ao lançamento no mercado ou do seu pedido até à entrega ao cliente, ou desde as matérias-primas à entrega do produto acabado ao cliente (Womack e Jones, 2003);

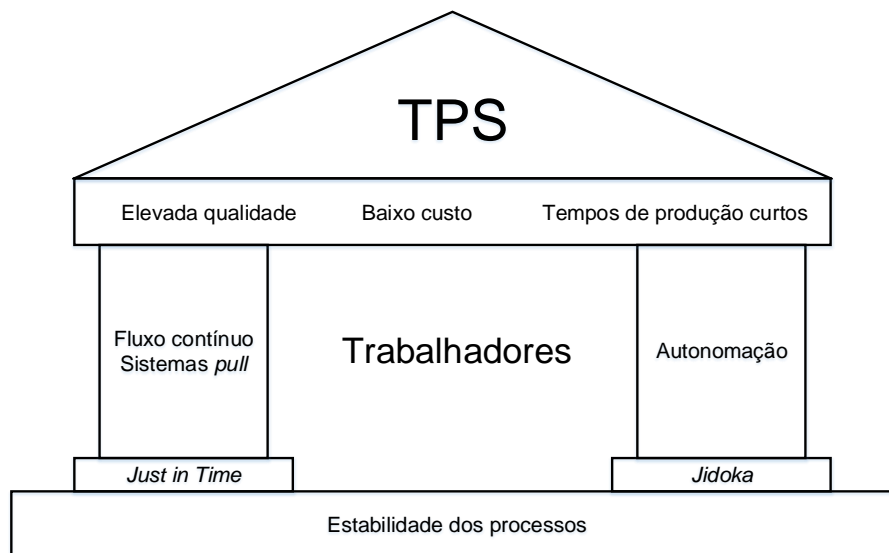


Figura 2.1 – *Lean House*.
Adaptado de: Machado (2014).

- Sistemas *pull*: sistema que interliga as ordens de produção e de entrega do produto ao longo da cadeia de abastecimento, no qual nada é produzido a montante sem haver um pedido do cliente a jusante (Womack e Jones, 2003), o que limita a quantidade de *Work in Progress* (WIP) (Hopp e Spearman, 2003);
- Estabilidade dos processos: a estabilidade dos processos pode ser definida como a capacidade de produzir de forma consistente ao longo do tempo. A instabilidade do processo é o resultado da variabilidade da procura ou da produção de produtos com diferentes características (formas ou dimensões, por exemplo) (Liker e Meier, 2006). Se as operações forem uniformizadas, isto é, se a forma de trabalhar variar pouco entre os trabalhadores, gera-se um ambiente de trabalho que não permite a criação de desperdício ou de variações dentro dos processos, no entanto, implica a condição de trabalhadores treinados e qualificados (Doğan e Unutulmaz, 2014). A estabilidade do processo é assegurada pela implementação das ferramentas do PL, nomeadamente, o *kaizen* (melhoria contínua), sistemas *kanban* (sistemas *pull*), *heijunka* (nivelamento da produção), 5S (arrumação e limpeza dos postos de trabalho), entre outras que, quando combinadas, permitem à organização atingir um desempenho estável, garantindo a sua vantagem competitiva (Fujimoto, 2012);
- Produção ao ritmo do *takt time*: entende-se por *takt time* o ritmo de produção correspondente à taxa de procura do cliente, ou seja, produzir ao mesmo ritmo que o produto é consumido pelo mercado. É definido pelo quociente entre o tempo disponível para produção (em unidades de tempo) e a procura (em unidades de produto por unidade de tempo). Por exemplo, se a procura diária de um produto é de 240 unidades e se a fábrica opera diariamente 480 minutos, então, o *takt time* é de 2 minutos por unidade (Womack e Jones, 2003). Portanto, o *takt time* refere-se à frequência com que um produto deve ser produzido para ir ao encontro das necessidades do mercado (Sundar *et al.* 2014).

Todavia, a eficiência do JIT só pode ser atingida através da redução dos tempos de *setup* que permitirão atingir o fluxo unitário de peças (*one piece flow*) (Hopp e Spearman, 2003), conceito que começa quando o cliente compra uma unidade de produto, despoletando o sistema de produção para a produção da unidade em falta (Wilson, 2010).

Womack e Jones (2003) definem *Jidoka* ou *autonomação* (automação com toque humano) como sendo a transferência da inteligência humana para os equipamentos automáticos, de modo a que estes cessem o seu funcionamento aquando da deteção de uma unidade defeituosa, enviando um sinal de alerta sonoro ou luminoso (denominado de *andon* em japonês). Esta técnica disponibiliza mais tempo aos trabalhadores para cumprirem as suas tarefas, sendo os equipamentos responsáveis pela função de controlo das características de qualidade (Wilson, 2010), conseguida através de dispositivos *poka-yoke*. O *poka-yoke* é, pois, um dispositivo à prova de falha que previne a ocorrência de um defeito durante a produção (Womack e Jones, 2003), reduzindo a necessidade de retrabalho, bem como a quantidade de defeitos e os custos associados à não qualidade (Hopp e Spearman, 2003).

A ideia central do *Jidoka* é, por um lado, impedir a geração e propagação de defeitos e, por outro, eliminar qualquer inconformidade no processo. Quando o equipamento interrompe a sua atividade ou o trabalhador interrompe a linha de produção (o *Jidoka* não é um conceito restrito aos equipamentos), o problema torna-se imediatamente visível ao próprio, aos seus colegas e à sua supervisão, desencadeando um esforço conjunto para a identificação e eliminação da causa raiz (inspeção na fonte), evitando a reincidência do problema e potenciando uma redução no número de paragens na linha no longo prazo. Este conceito garante uma inspeção de todas as unidades produzidas (inspeção a 100%), em vez do conceito por amostragem (Ghinato, 2006).

2.1.3. Princípios e desperdícios

Uma organização que pretenda implementar o PL na sua cultura, terá de (Womack e Jones, 2003):

1. Definir de forma precisa o valor (*value*) que corresponde à capacidade de fornecer ao cliente um produto ou serviço capaz de satisfazer os seus requisitos de qualidade, quantidade e tempo de uma forma fiável e consistente, através de uma boa relação custo-eficácia (Machado, 2007). Todo o processo de produção e entrega do produto final ao cliente deve ser analisado e otimizado com base nesta definição (Lian e Landeghem, 2002) que deve ser idêntica para todos os intervenientes na cadeia de abastecimento e não sob uma perspetiva das organizações industriais, funções e departamentos (Hines *et al.*, 2008). Sem um entendimento robusto do que o cliente valoriza, a implementação do PL não terá sucesso (Melton, 2005);
2. Identificar a cadeia de valor (*value chain*) que diz respeito ao conjunto de todas as atividades necessárias para entregar o produto ou serviço ao cliente, desde o desenvolvimento até ao lançamento, indo das matérias-primas à entrega de produto acabado (Womack e Jones, 2003), de modo a realçar as fontes de desperdício (Rother e Shook, 1999). Melhorar, segundo esta perspetiva, significa melhorar globalmente o processo e não otimizar individualmente as suas

partes, ou seja, não se limitar a melhorar processos individuais, departamentos ou funções (Melton, 2005);

3. Promover um fluxo contínuo (*flow*) ao longo da cadeia de valor sem interrupções, defeitos, retrabalhos, esperas ou sucatas, através da eliminação de todas as atividades que não acrescentam valor (Womack e Jones, 2003). O fluxo contínuo é a chave não só da melhoria contínua do processo, pois torna-o mais eficiente, como também do desenvolvimento intelectual dos trabalhadores, tendo em conta que a identificação e a resolução de problemas se tornam imediatas (Liker e Meier, 2006);
4. Produzir apenas o que é “puxado” (*pull*), ou seja, exigido pelo cliente (Hines *et al.* 2008) e que é conseguido através da sincronização dos tempos de ciclo das atividades (tempo necessário para a conclusão de um ciclo de operações de uma atividade) com o *takt time*, da sinalização no reabastecimento de materiais (através de sistemas *kanban*), do nivelamento da produção da família de produtos (*heijunka*) bem como das respetivas quantidades ao longo do tempo (Sundar *et al.*, 2014);
5. Ambicionar a perfeição (*perfection*) através da remoção contínua de desperdícios ao longo da cadeia de valor. Este conceito poderá ser considerado utópico, já que alcançá-la é na verdade impossível, mas os esforços para a alcançar fornecem a inspiração e direção necessárias para a melhoria contínua do processo (Womack e Jones, 2003);

A Figura 2.2 explicita como estes cinco princípios (valor, cadeia de valor, fluxo contínuo, *pull* e perfeição) devem estar interligados, formando um ciclo que deverá ser mantido durante toda a vida útil do produto (ou família de produtos) como uma atividade de rotina da gestão da organização. Estes cinco princípios chave ao serem aplicados de forma contínua, vão permitir a redução e eliminação dos sete desperdícios fundamentais e a consequente redução de custos (Maia *et al.*, 2011).

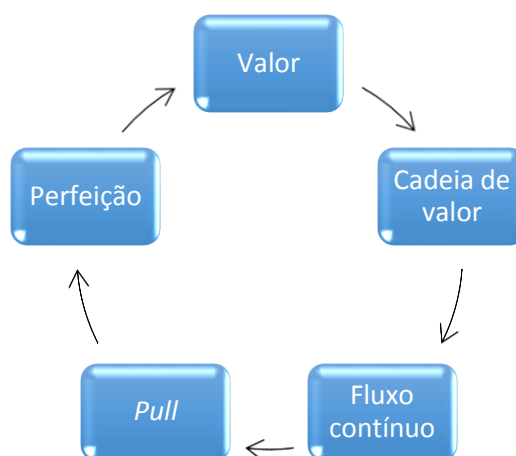


Figura 2.2 – Os cinco princípios do pensamento *lean*.
Adaptado de: Domingues (2013)

O desperdício é algo inerente a qualquer processo, mesmo em sistemas altamente eficientes, pelo que a sua eliminação total ao longo da cadeia de valor não é possível (Gopinath e Freheit, 2011). Como tal, importa referir as três possíveis áreas de atuação identificadas pela TMC:

1. *Mura*: variabilidade excessiva do produto ou processo em termos de quantidade ou qualidade (Acharya, 2011);
2. *Muri*: representa o excesso causado por fatores extrínsecos à organização, como flutuações na procura (Acharya, 2011);
3. *Muda*: puro desperdício, isto é, qualquer atividade não necessária que consome recursos, mas que não acrescenta valor ao produto ou serviço (Womack e Jones, 2003).

Melton (2005) e Hines *et al.* (2008) citam alguns resultados do *Lean Enterprise Research Centre* (LERC) numa conferência na *Cardiff Business School* em 2004, na qual se revela que na maioria das organizações em contexto industrial:

- Apenas 5% das atividades acrescentam valor;
- 35% das atividades são necessárias, mas não acrescentam valor do ponto de vista do cliente. São atividades necessárias que acrescentam valor do ponto de vista da organização (por exemplo, controlos financeiros ou controlos de qualidade);
- 60% das atividades não acrescentam valor e são puro desperdício. São completamente dispensáveis para o processamento do produto ou serviço.

A TMC identifica os sete tipos de desperdício (*muda*) fundamentais e comuns às organizações, nomeadamente:

1. Defeitos (*Defects*): produção de inconformidades na qualidade do produto ou na entrega deste (Hines *et al.*, 2008);
2. Excesso de produção (*Overproduction*): produção antecipada em relação à procura (Gopinath e Freheit, 2011) ou em quantidade superior à exigida pelos clientes (Hines *et al.*, 2008). Este é considerado um dos piores desperdícios já que gera outros, tais como, excesso de trabalhadores, *stocks*, transporte e, ainda, proporciona um fluxo ineficiente de materiais e informação (Liker e Meier, 2006);
3. Excesso de *stocks* (*Inventory*): matérias-primas ou WIP que não estão a ser processados (Gopinath e Freheit, 2011). Este desperdício potencia uma redução no nível de serviço prestado ao cliente, já que potencia um atraso no tempo de processamento do produto e da informação associada (Hines *et al.*, 2008), aumentos dos custos de transporte e armazenamento, podendo levar à obsolescência ou à deterioração do produto. O excesso de *stocks* poderá esconder outros problemas, tais como, produção não balanceada, atrasos nas entregas dos fornecedores, defeitos e longos tempos de *setup* (Liker e Meier, 2006);

4. Excesso de processamento (*Overprocessing*): processar mais do que necessário na transformação das matérias-primas em produto acabado (Gopinath e Freheit, 2011), ou seja, fornecer um produto com uma qualidade superior à exigida (Liker e Meier, 2006). Corresponde, também, a fases do processo que não acrescentam valor para o cliente (Melton, 2005);
5. Movimentação (*Motion*): movimentações excessivas dos trabalhadores nas instalações ou entre estações de trabalho (Gopinath e Freheit, 2011). O excesso de troca de informação ou de tomada de decisões é também considerado um desperdício de movimentação (Melton, 2005);
6. Transporte (*Transportation*): transporte excessivo de trabalhadores, informação ou material, resultando em desperdícios de tempo, esforço e dinheiro (Hines *et al.*, 2008);
7. Espera (*Waiting*): longos períodos de inatividade de pessoas, equipamentos, informação ou produtos (Melton, 2005);

Liker e Meier (2006) referem, ainda, um oitavo desperdício que é o desaproveitamento da criatividade dos trabalhadores. Qualquer perda de tempo associada à desvalorização das ideias, aptidões, melhorias e oportunidades de aprendizagem dos trabalhadores constitui um desperdício para a organização.

2.1.4. Benefícios do pensamento *lean*

A sobrevivência de uma organização depende da sua capacidade em responder, de forma sistemática e contínua, às alterações impostas pelo mercado e pela concorrência, seja em ambientes industriais ou de serviços. Logo, deverá ser flexível e capaz de responder rapidamente às exigências dos clientes através da reorganização dos seus sistemas produtivos, a partir do ponto de entrega do produto ao cliente final, fornecendo um produto adequado às necessidades do mesmo. A implementação do PL torna-se um fator de sustentabilidade da organização como forma de responder às constantes alterações impostas por fatores externos e internos (Sundar *et al.*, 2014). Assim, a implementação do PL poderá ter os seguintes benefícios numa organização:

- Redução global dos custos (Melton, 2005) devido a:
 - Redução do capital circulante;
 - Redução dos custos de produção;
- Menor investimento (em *stocks*, ferramentas e/ou equipamentos);
- Melhor ambiente de trabalho (Rother e Shook, 1999);
- Melhoria na gestão do conhecimento (Melton, 2005);
- Menos engenharia no desenvolvimento de novos produtos (Wilson, 2010);

- Processos mais robustos devido à redução de erros na produção e consequentes retrabalhos (Melton, 2005);
- Menor WIP (Anvari *et al.*, 2011);
- Aumento da capacidade produtiva e de resposta ao cliente;
- Aumento da diversidade de produtos (Rother e Shook, 1999);
- Aumento da qualidade dos produtos e serviços (Wilson, 2010);
- Aumento das receitas;
- Aumento da confiança entre gestores e trabalhadores (Rother e Shook, 1999);
- Aumento da satisfação do cliente e dos trabalhadores da organização;
- Aumento do desempenho e agilidade de toda a cadeia de abastecimento de uma organização (Melton, 2005);
- Aumento da segurança dos trabalhadores;
- Sentido de responsabilidade na entrega de valor ao cliente (Rother e Shook, 1999);

2.2. Algumas ferramentas do pensamento *lean*

Neste subcapítulo são apresentadas algumas das ferramentas que possibilitam a implementação do PL, isto é, a sua aplicação visa a melhoria do sistema, quer a nível do processo, quer a nível do fluxo.

São abordadas as ferramentas *Spaghetti Diagram*, *Kaizen*, 5S e *Value Stream Mapping* (VSM), apesar de existirem outras.

2.2.1. *Spaghetti Diagram*

O *Spaghetti Diagram* é uma ferramenta que serve para acompanhar o fluxo da informação e das atividades dentro de um ambiente de trabalho. Trata-se de um mapa que regista o percurso dos produtos à medida que avançam na cadeia de valor em direção ao cliente. Apresenta como principal vantagem a visualização das movimentações e transportes de materiais e informação ao nível do *shop-floor* (Hines *et al.*, 2002). Ao evidenciar todas as movimentações e transportes necessários à conceção do produto, torna-se fácil a identificação das oportunidades de melhoria para minimizar os desperdícios associados às movimentações e aos transportes (Wilson, 2010).

A Figura 2.3 ilustra um exemplo de um *Spaghetti Diagram*, na qual é possível observar as várias movimentações ao longo de um processo.



Figura 2.3 – Exemplo de um *Spaghetti Diagram*.
Adaptado de: Hines *et al.* (2002).

2.2.2. Kaizen

Kaizen é a palavra japonesa cuja génese resulta da aglutinação dos termos “kai” (mudança) e “zen” (bom, para melhor). Sundar *et al.* (2014) citando Deming refere que a melhoria contínua consiste nas iniciativas que visam aumentar o sucesso da organização e reduzir as suas falhas. Os mesmos autores acrescentam que a melhoria contínua é um elemento que parte da gestão da organização e que motiva a mudança cultural no ambiente de trabalho, pelo que, o *kaizen* corresponde a uma mentalidade que se foca no esforço de melhorar continuamente. Distingue-se *flow kaizen* quando as implementações previstas visam melhorar o fluxo de materiais e informação ao longo da cadeia de valor, de *process kaizen*, sempre que o objetivo é eliminar desperdício ao nível do *shop-floor*, focando-se, assim, nas pessoas e nos processos (Rother e Shook, 1999).

A implementação de um espírito de melhoria contínua nas organizações requer duas condições: a confiança e responsabilidade do trabalhador na eficácia do seu trabalho e trabalhadores formados, conhecedores, empenhados no desempenho do seu trabalho e no cumprimento dos objetivos da organização (Alves *et al.*, 2011).

2.2.3. 5S

O 5S é uma ferramenta que se foca na melhoria das condições de trabalho, através da remoção dos resíduos e utensílios desnecessários e atribuição de locais específicos para a arrumação das ferramentas (Womack e Jones, 2003), o que facilita ao trabalhador o controlo visual (Wilson, 2010). Esta ferramenta tem como objetivo principal eliminar o desperdício de movimentações (*motion*), já que evita a procura de utensílios ou ferramentas por parte dos trabalhadores (Liker e Meier, 2006). Cada

“S” corresponde a uma palavra japonesa com tradução em inglês e português cuja interpretação pode ser feita da seguinte maneira (Womack e Jones, 2003):

1. *Seiri/Separate/Organização*: consiste em separar as ferramentas, componentes ou instruções úteis das que não o são (consideradas, portanto, desperdício). Contudo, são os restantes “S” que permitem o desenvolvimento de uma disciplina nos hábitos de trabalho, fundamentais para a implementação do PL (Liker e Meier, 2006);
2. *Seiton/Set to order/Arrumação*: significa identificar e organizar as ferramentas ou componentes em função da facilidade do seu manuseamento;
3. *Seiso/Shine/Limpeza*: significa limpeza do posto de trabalho;
4. *Seiketsu/Standardize/Padronização*: quer dizer estandardizar o posto de trabalho, ou seja, perpetuar a aplicação dos três primeiros “S”, frequentemente, para manter o posto de trabalho em condições “perfeitas”;
5. *Shitsuke/Sustain/Disciplina*: fazer de um hábito o seguimento dos primeiros 4 “S”.

Esta ferramenta, segundo Hirano citado por Jaca *et al.* (2013), é um pré-requisito para a implementação de outras ferramentas do PL e a base para a eliminação do desperdício. Os mesmos autores consideram o 5S uma das mais conhecidas ferramentas do PL, extensível a qualquer organização e tida como uma abordagem à melhoria contínua do processo.

2.2.4. Value Stream Mapping

O VSM ou o Mapeamento do Fluxo de Valor é considerado um pré-requisito para a implementação de um fluxo tipicamente *lean* (Maia *et al.*, 2011) porque fornece uma visão global do processo, potenciando um esforço de melhoria ao nível do fluxo produtivo (Rother, 2010). Uma vez que um dos objetivos da presente dissertação é aumentar a visibilidade do processo produtivo do caso de estudo, esta ferramenta será examinada de forma mais detalhada em relação às outras anteriormente abordadas.

O VSM é uma ferramenta de fácil utilização que se destina à redução do *lead time* do processo, através da representação de todas as suas fases e respetivos fluxos de materiais e informação a que o produto (ou família de produtos) está sujeito ao longo da cadeia de valor (Rother e Shook, 1999). Ao representar todas as atividades (quer de valor acrescentado, quer de valor não acrescentado) necessárias para trazer o produto até ao cliente final, as fontes de desperdício são identificadas podendo, assim, serem definidas as diretrizes de melhoria (estabelecidas através de eventos *kaizen*) que vão de encontro à sua eliminação (Wilson, 2010).

A aplicação da ferramenta inclui dois mapas: o mapa do estado atual (*Current State Map*, CSM) e o mapa do estado futuro (*Future State Map*, FSM) que prevê as implementações das melhorias definidas pelos eventos *kaizen*. À medida que vão sendo implementadas as melhorias previstas pelo FSM, de forma a erradicar as fontes de desperdício, vão surgindo outras que não eram ainda visíveis. Logo, faz sentido perpetuar o ciclo de construção do VSM para que os gestores da organização, em conjunto

com a sua equipa, removam de forma contínua as fontes de desperdício à medida que vão sendo identificadas (Rother e Shook, 1999). A Figura 2.4 evidencia este ciclo, de forma esquemática, a aplicação desta ferramenta.

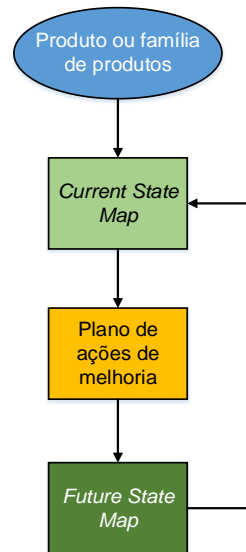


Figura 2.4 – Aplicação do VSM.
Adaptado de: Rother e Shook (1999).

Rother e Shook (1999) sugerem a seguinte metodologia para a construção do VSM:

1. Escolher um produto (ou família de produtos);
2. Desenhar o CSM através da recolha de informação ao nível do *shop floor*. O CSM deve conter informações relativas a:
 - a. Tempos de ciclo das atividades do processo;
 - b. Tempos de *setup*;
 - c. Tempo disponível (equipamentos e trabalhadores);
 - d. *Stocks*;
 - e. Dimensão dos lotes;
 - f. Número de trabalhadores;
 - g. Número de variações (modelos) do produto;
 - h. Dimensão da embalagem ou palete;
 - i. Tempo produtivo;
 - j. Percentagem de inconformidades.
3. Elaborar o plano de melhorias a implementar com base na análise do CSM;

4. Desenhar o FSM, com vista a melhorar o fluxo produtivo evidenciado pelo CSM;

No Anexo A.1. é apresentada a simbologia do VSM e a metodologia a seguir passo a passo na construção do CSM.

A construção do CSM é puro desperdício, a menos que seja construído o FSM como forma de prever a implementação das melhorias identificadas pelo primeiro, servindo de base para as alterações a fazer no sistema (Rother e Shook, 1999). É através do CSM que se define a situação atual do sistema, no qual se quantificam os tempos de valor (ou não) acrescentado, se traçam as oportunidades de melhoria e se procede à construção do estado ideal (FSM) cujo objetivo é a criação de um fluxo contínuo ao longo da cadeia de valor e que pode ser atingido com recurso a outras ferramentas do PL (Liker e Meier, 2006). Para atingir o objetivo delineado, deve-se ter em conta o tempo requerido e os recursos disponíveis (Pinto, 2008).

Rother e Shook (1999) identificam os seguintes benefícios resultantes da implementação do VSM:

- Permite visualizar o fluxo de materiais e informação ao longo da cadeia de valor e não apenas numa parte do processo;
- Permite identificar as fontes de desperdício e as respetivas causas ao longo de toda a cadeia de valor;
- Fornece uma linguagem comum, simples e intuitiva para todos os intervenientes da cadeia de valor;
- Evidencia oportunidades de melhoria ao nível do fluxo produtivo;
- Possibilita a escolha da ferramenta do PL mais adequada para a melhoria do processo;
- Fornece uma base para o plano de implementação de melhorias no processo;
- Mostra a relação entre o fluxo de materiais e de informação;
- Permite uma descrição detalhada de como o processo devia atuar de forma a estabelecer um fluxo contínuo;
- Serve de base para a tomada de decisão por parte da gestão da organização, já que faculta uma visão geral do processo, ajudando, assim, na definição das equipas de melhoria (Hines *et al.*, 2002).

O verdadeiro poder do VSM reside quer na sua capacidade de unir esforços dos diferentes elementos da organização, com vista à redução contínua do desperdício, quer na conceção de planos de melhoria contínua, potenciando, consequentemente, o sucesso da organização (Liker e Meier, 2006).

Apesar da facilidade na aplicação do VSM, esta ferramenta revela algumas limitações. De facto, o VSM destina-se à melhoria do fluxo na cadeia de valor e não à melhoria do processo, pelo que (Rother, 2010):

1. O VSM pode revelar demasiadas oportunidades de melhoria, tornando-se difícil a sua priorização. Tentar solucionar todos os problemas evidenciados pelo VSM pode levar à perda do objetivo delineado pelo plano de implementação, perdendo-se o foco das oportunidades de melhoria;
2. O VSM baseia-se numa análise superficial tendo em conta que se foca apenas na situação atual e no estado futuro, podendo passar despercebidas oportunidades de melhoria a nível do processo.

Para além das limitações supramencionadas, a construção do VSM não só é ineficiente, como também é incapaz de descrever o comportamento dinâmico do processo produtivo. Acresce ainda ser de caráter subjetivo, já que é elaborado por uma pessoa responsável, podendo existir várias versões em função da perceção do responsável. A melhor forma de contrariar estas limitações é recorrer a um estudo de simulação do processo, pois permite à gestão da organização observar o impacto das implementações das propostas de melhoria e transformar o sistema de acordo com essas propostas ao menor custo (Lian e Landeghem, 2002).

Assim, é vantajoso utilizar uma ferramenta complementar ao VSM capaz de quantificar os ganhos durante o planeamento das melhorias previstas. A simulação é uma escolha adequada pois é capaz de prever a utilização dos recursos, recolher estatísticas de desempenho do sistema e explorar diferentes configurações do mesmo (Doğan e Unutulmaz, 2014). Um modelo de simulação é capaz de reproduzir as incertezas e os aspetos dinâmicos típicos de um sistema produtivo, como os níveis de *stock*, *lead time* e a taxa de utilização dos recursos, tornando explícita a quantificação dos ganhos resultantes da implementação das ferramentas do PL, o que é fundamental para o apoio da gestão da organização no processo de melhoria contínua. Contudo, através de um estudo de simulação, não é possível nem modelar, nem quantificar os ganhos da aplicação de ferramentas de controlo visual, como o 5S (Abdulmalek e Rajgopal, 2006).

2.3. Simulação

Dadas as limitações do VSM, justifica-se o uso da simulação para descrever o comportamento dinâmico do sistema e quantificar os ganhos das sugestões de melhoria com base no PL. Assim sendo, é desenvolvido um modelo de simulação para representar o estado atual do sistema (correspondente ao CSM) e são desenvolvidos outros modelos que visem a implementação de algumas melhorias no processo (FSM), com a vantagem de poderem ser comparados estatisticamente. No presente caso de estudo, será utilizado o *software* ARENA dada a sua versatilidade, pois combina a facilidade do uso com a flexibilidade de programar e dispõe de ferramentas gráficas e animações que ajudam na compreensão, verificação e validação do modelo de simulação.

2.3.1. Enquadramento

A simulação refere-se a um conjunto vasto de métodos e aplicações para imitar o comportamento de um sistema, recorrendo a computadores com *softwares* apropriados (Kelton *et al.*, 2004). Por sistema,

entende-se um conjunto de componentes que interagem entre si, com o propósito de transformar *input* em *output* (Chung, 2003). Um sistema é, geralmente, uma instalação na qual ocorre um processo que será o objeto do estudo da simulação. O objetivo deste estudo é avaliar as medidas de desempenho do processo e desenvolver cenários ou modelos alternativos que visem a melhoria destas medidas (Kelton *et al.*, 2004).

Para efetuar um estudo científico num sistema devem ser assumidos pressupostos que ajudem na sua simplificação porque, regra geral, apresenta um comportamento muito complexo. A estas abstrações chamam-se modelos cujos pressupostos se baseiam em relações lógicas e matemáticas que ajudam na compreensão e descrição do sistema real (Law e Kelton, 1991). Portanto, um modelo não é mais do que uma representação do sistema real (Banks, 1998).

A Figura 2.5 explicita a forma como pode ser feito um estudo de um sistema.

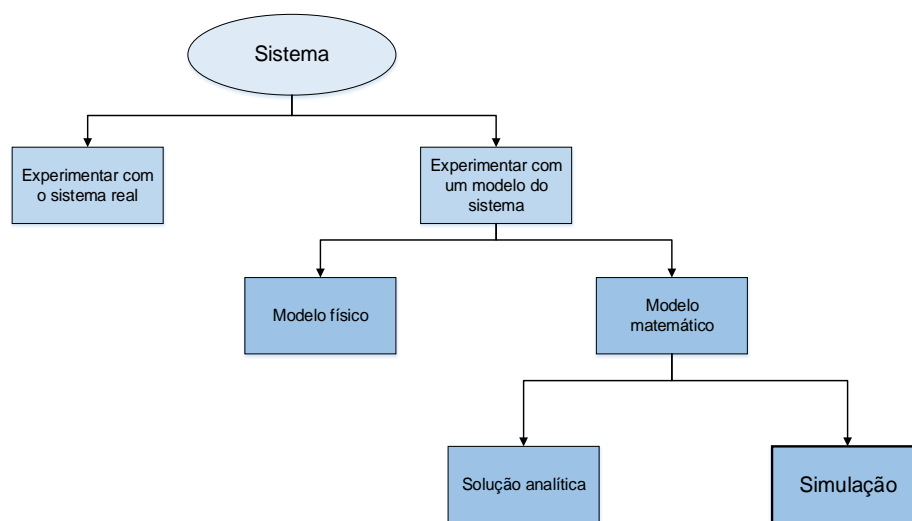


Figura 2.5 – Estudo de um sistema.
Adaptado de: Law e Kelton (1991)

Deverá estudar-se diretamente o sistema real se assim for possível e economicamente viável, pois os resultados das alterações impostas serão inquestionáveis (Law e Kelton, 1991). Neste caso, não existe a necessidade de construir um modelo que represente fidedignamente o sistema em estudo (Kelton *et al.*, 2004). No entanto, raramente é possível, ou até mesmo impossível, experimentar diretamente no sistema porque as alterações impostas podem ter efeitos indesejáveis, implicando custos elevados. Além do mais, o sistema que se pretende estudar poderá nem sequer existir. Por estas razões, deve ser desenvolvido um modelo que represente o sistema (Law e Kelton, 1991).

Ao utilizar um modelo, pode optar-se pela construção de uma réplica do sistema, denominando-a, neste caso, de modelo físico ou icónico. Um simulador de voo destinado para treinar pilotos ou um jogo de computador são exemplos deste tipo de modelos. Em alternativa, opta-se pelo desenvolvimento de um modelo matemático (ou lógico) para representar um sistema através de relações lógicas e matemáticas que descrevem o seu funcionamento e como este funcionaria sob determinadas condições (Law e Kelton, 1991). Um modelo matemático representa um conjunto de aproximações e pressupostos (quer

em termos estruturais, quer em termos quantitativos) que são utilizados para descrever o funcionamento do sistema na situação atual e nos cenários ou modelos alternativos. Regra geral, os modelos matemáticos são mais fáceis, económicos e mais rápidos na obtenção de respostas através da manipulação dos *inputs* do modelo (Kelton *et al.*, 2004).

Se o modelo (sistema) for suficientemente simples, o modelo matemático pode ser capaz de encontrar uma solução exata do problema, ou seja, uma solução analítica, através da abordagem da matemática tradicional (programação linear, equações diferenciais ou teoria das filas de espera). Todavia, na maioria dos casos, os sistemas são demasiado complexos, tornando-se difícil (ou mesmo impossível) encontrar uma solução exata. Logo, devem-se procurar estimativas da solução exata, o que justifica o uso de *softwares* de simulação. Assim, define-se simulação computacional como um método numérico capaz de imitar as características e os processos de um sistema, fazendo uso de um *software* adequado para simular o seu comportamento em diversas condições (Kelton *et al.*, 2004) e avaliar o efeito dos *inputs* nas suas medidas de desempenho (*outputs*) (Law e Kelton, 1991).

A modelação de um sistema envolve duas componentes (Kelton *et al.*, 2004):

- Modelação estrutural: consiste no encadeamento lógico das várias fases do processo, ou seja, no desenvolvimento da lógica fundamental do modelo;
- Modelação quantitativa: desenvolvimento das relações matemáticas que ditam o funcionamento do modelo.

2.3.2. Objetivos de um estudo de simulação

Segundo Chung (2003), um estudo de simulação tem como objetivos:

- Aumentar a visibilidade do sistema: recorrendo a um modelo de simulação, é possível observar através da animação os vários processos e estudá-los de forma isolada;
- Melhorar o desempenho do sistema: é possível testar diferentes políticas de gestão das operações (atribuindo prioridades a trabalhos em curso, por exemplo) ou dos recursos (aumentar ou diminuir o número de trabalhadores, por exemplo) que visem melhorar globalmente o sistema;
- Prever o funcionamento de um sistema: numa fase de projeto, o sistema inexistente poderá ser simulado para prever o seu desempenho, o que permite aperfeiçoar as características desejadas (por exemplo, o número de equipamentos ou de trabalhadores);
- Obter informações sem perturbar o funcionamento do sistema atual;

2.3.3. Vantagens e desvantagens da simulação

São várias as vantagens em desenvolver um modelo de simulação no contexto das organizações, como forma de ganhar vantagem competitiva. De seguida, são enumeradas algumas:

1. Alocação racional de recursos: uma vez que a simulação permite prever o funcionamento de um sistema, é possível determinar os recursos necessários, pois qualquer alteração após a construção do sistema real traduzir-se-ia em custos mais elevados (Banks, 1998);
2. Comprimir ou expandir o tempo de simulação: a simulação permite manipular o tempo decorrido, pelo que é possível acelerar (ou atrasar) todo o processo para que se possa estudar um fenómeno de particular interesse (Banks, 1998). Além do mais, permite estudar o funcionamento do sistema durante meses ou anos em apenas alguns segundos, dependendo da complexidade do modelo e da capacidade do *software* (Chung, 2003);
3. Comparar cenários ou modelos alternativos: independentemente de o sistema existir ou não, é possível estudá-lo sob diversas condições, com as vantagens de não interferir no seu desempenho normal e de controlar eficazmente as condições impostas (Law e Kelton, 1991);
4. Diagnóstico de problemas: a simulação possibilita a compreensão das interações dos fatores que compõem um sistema, permitindo estudar os seus efeitos e, conseqüentemente, identificar oportunidades de melhoria (Banks, 1998);
5. Identificar estrangulamentos (*bottlenecks*): através do uso da simulação, é possível identificar estrangulamentos de materiais ou informação, potenciando a eliminação da sua causa (Banks, 1998);
6. Flexibilidade: sendo uma ferramenta muito versátil, pode ser aplicada em qualquer área, desde a indústria aos serviços (Law e Kelton, 1991);
7. Modelos de fácil demonstração (Chung, 2003): ao animar o modelo de simulação, é possível não só verificá-lo (através da observação das relações lógicas), como também demonstrar o seu funcionamento a todos os intervenientes da organização, possibilitando ações de melhoria.

Apesar disso, existem algumas desvantagens resultantes da aplicação da simulação, nomeadamente:

1. Os resultados da simulação podem ser de difícil interpretação (Banks, 1998): cada corrida de simulação produz apenas estimativas das verdadeiras medidas de desempenho do sistema. É por este motivo que a simulação não é considerada uma ferramenta de otimização, mas uma ferramenta de apoio à decisão porque permite comparar um conjunto de cenários ou modelos alternativos, sendo da responsabilidade do decisor escolher qual o mais conveniente (Law e Kelton, 1991). Além do mais, se a qualidade do *input* não for a adequada, a do *output* tão pouco será, isto é, "*garbage in, garbage out*" ("lixo gera lixo") (Kelton *et al.*, 2004);
2. Os *softwares* de simulação são caros e o desenvolvimento de modelos de simulação exige tempo (Law e Kelton, 1991);
3. O desenvolvimento de modelos de simulação requer formação e aprendizagem: simular é uma "arte" que deve ser aprendida ao longo do tempo através da experiência adquirida (Banks,

1998). Mesmo com o desenvolvimento de novas linguagens de simulação, a sua modelação e análise podem ser demasiado complexas (Chung, 2003);

4. O uso da simulação pode ser inapropriado: por vezes, a simulação é utilizada para solucionar questões passíveis de serem resolúveis através de métodos analíticos que são preferíveis dada a sua exatidão (Banks, 1998).

A simulação pode ser aplicada em qualquer contexto, dada a sua flexibilidade. Uma vez que o presente caso de estudo se insere num contexto produtivo, é dado mais ênfase à sua aplicação neste contexto.

2.3.4. A simulação em contextos industriais

Em contextos industriais, Law e McComas (1999) identificam alguns pontos específicos nos quais a simulação pode ser utilizada como uma ferramenta para conceber novos sistemas de produção ou para melhorar sistemas existentes, nomeadamente:

- Equipamentos e pessoas:
 - Avaliação e dimensionamento do número, natureza e *layout* de equipamentos para um objetivo específico;
 - Avaliação da necessidade de transportadores, correias de transporte ou outros equipamentos de suporte;
 - Localização e tamanho dos *stocks* intermédios (supermercados);
 - Avaliação da alteração no volume de produção de um ou mais produtos;
 - Avaliação dos efeitos de um equipamento novo no sistema produtivo;
 - Avaliação de investimentos de capital;
 - Avaliação das alterações das atuais políticas laborais;
 - Avaliação do número de turnos de trabalho.
- Avaliação do desempenho:
 - Análise da produtividade;
 - Análise do tempo de permanência de um produto no sistema;
 - Análise de estrangulamentos na produção (*bottleneck analysis*);
- Avaliação dos procedimentos operacionais:
 - Nivelamento da produção;
 - Políticas de gestão de *stocks*;
 - Análise de fiabilidade dos equipamentos;

- Políticas de controlo da qualidade.

Os mesmos autores sugerem ainda algumas medidas de desempenho que poderão ser úteis na análise de sistemas em contextos produtivos:

1. Produtividade;
2. Tempo de permanência de um produto no sistema;
3. Tempo nas filas de espera;
4. Tamanho das filas de espera (número médio de componentes que aguardam uma dada fase do processo, por exemplo);
5. Cumprimento dos processos de entrega;
6. Utilização dos recursos (equipamentos e trabalhadores).

A indústria é um exemplo da utilidade da simulação, mas é também aplicada nos serviços. A Tabela 2.1 reúne alguns casos de estudo descritos na literatura científica e a respetiva área de aplicação para o aprofundamento da utilidade de um estudo de simulação.

Tabela 2.1 – Áreas de aplicação da simulação.

Áreas de aplicação	Autores
Sistemas logísticos	Gattuso e Cassone (2011)
Serviços de saúde	McGuire (1998), Doğan e Unutulmaz (2014)
Gestão da cadeia de abastecimento	Holweg e Bicheno (2000)
Tráfego automóvel	Balci (1998)
Tráfego marítimo	Köse <i>et al.</i> , (2003)
Setor bancário	Laughery <i>et al.</i> (1998)
Militar	Kang e Roland (1998)

2.3.5. Estudo de simulação

O modelo de simulação deve ser classificado em três dimensões, de forma a garantir o sucesso do estudo (Law e Kelton, 1991; Kelton *et al.*, 2004). Tal como ilustrado pela Figura 2.6, o modelo pode ser determinístico ou estocástico, estático ou dinâmico e, no caso de ser dinâmico, ainda pode ser classificado em discreto ou contínuo.

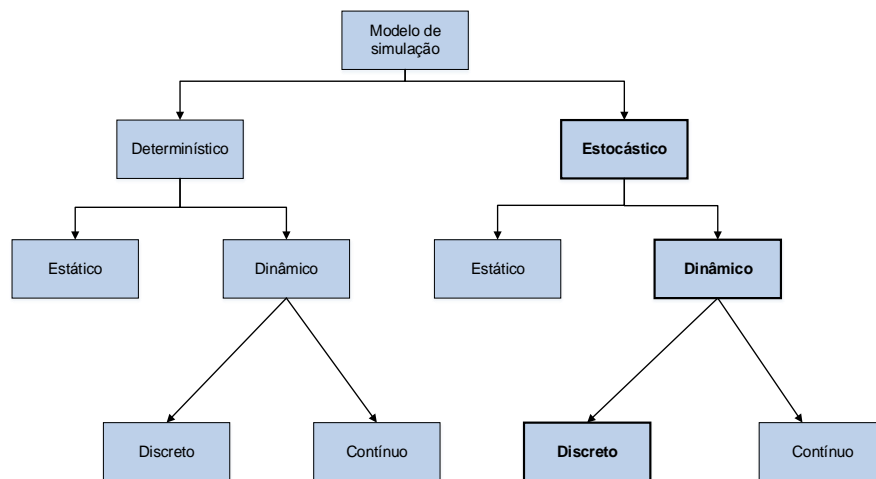


Figura 2.6 – Classificação dos modelos de simulação.
Adaptado de: Banks *et al.* (2014).

Um modelo de simulação diz-se determinístico se o seu *input* não é modelado através de uma variável aleatória com uma distribuição de probabilidade. Caso contrário, o modelo diz-se estocástico. Importa referir que *inputs* estocásticos geram *outputs* também estocásticos.

Se interessar estudar a evolução do sistema ao longo do tempo, isto é, se a variável tempo for significativa, o modelo deve ser dinâmico. Caso contrário, será estático.

Se o modelo for dinâmico, o seu estado pode variar ao longo do tempo. Se o seu estado for alterado em pontos isolados no tempo, então é considerado discreto; se, pelo contrário, o seu estado for evoluindo continuamente ao longo do tempo, então é contínuo.

Nesta dissertação será desenvolvido um o modelo de simulação estocástico, dinâmico e discreto, dadas as características do sistema em estudo. Estudos de simulação cujo modelo é estocástico, dinâmico e discreto dá-se a designação de *Discrete Event Simulation* (DES).

Além da classificação de modelos, o estudo de simulação poderá ser do tipo *terminating* ou *nonterminating* (ou *steady-state*). Num estudo de simulação do tipo *terminating*, o modelo decreta as condições de início e de fim da simulação. Logo, é necessário especificar as condições iniciais e de término da simulação. Neste tipo de estudo, as condições iniciais afetam as medidas de desempenho do modelo, pelo que é importante defini-las para representar fidedignamente o sistema (Law e Kelton, 1991). A título de exemplo, modelar um restaurante poderá ser deste tipo: existe uma hora de abertura e de encerramento e, durante esse período, os clientes chegam, ocupam e abandonam o sistema. É de esperar que à hora de abertura e de encerramento o restaurante não tenha clientes.

No estudo de simulação do tipo *steady-state* as condições iniciais do sistema não são relevantes. Importa analisar o seu funcionamento numa janela temporal teoricamente infinita, portanto, no seu estado estacionário. Um serviço de urgências num hospital é um exemplo, uma vez que o serviço está a funcionar continuamente ao longo do tempo (Kelton *et al.*, 2004).

Law (2009) sugere os 7 passos a adotar num estudo de simulação para o desenvolvimento de um modelo DES (Figura 2.7):

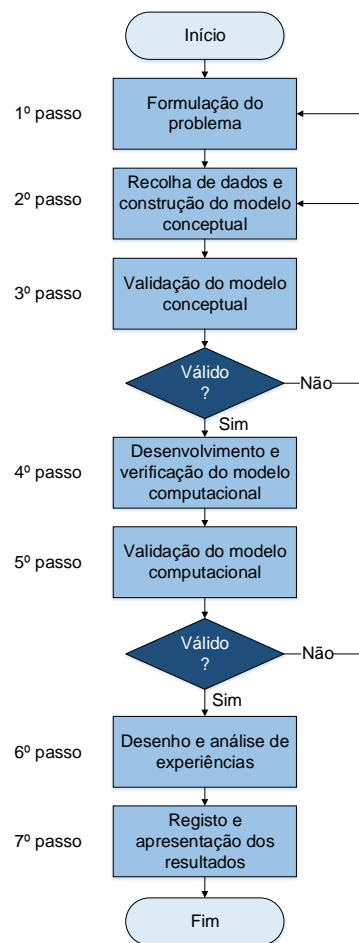


Figura 2.7 – Metodologia de um estudo de simulação.
(Adaptado de: Law (2009)).

1º passo – Formulação do problema: é o decisor que identifica o problema atual. É nesta fase que são definidos os objetivos do estudo, as questões a serem respondidas, os recursos disponíveis (pessoas, custo e horizonte temporal do estudo), os cenários alternativos e as medidas de desempenho a serem analisadas nos vários cenários. Sem uma clara definição destas questões, é impossível determinar o nível de detalhe do modelo, o que pode comprometer a veracidade das conclusões do estudo de simulação. Assim, o 1º passo consiste na compreensão do que se pretende atingir através do estudo de simulação. É possível que o problema tenha de ser reformulado à medida que se avança no estudo de simulação (Banks, 1998). Um objetivo deste estudo poderá ser, por exemplo, a redução do desperdício no processo (Chung, 2003).

2º passo – Recolha de dados e desenvolvimento do modelo conceptual: é nesta fase que o responsável pelo estudo de simulação deverá recolher a partir do sistema real (se existir) todos os dados necessários ao desenvolvimento do modelo. Um modelo conceptual consiste numa abstração do sistema real cuja representação esquemática evidencia as várias relações lógicas e matemáticas que o compõem e estruturam (Banks, 1998). É conveniente conhecer o funcionamento do sistema, uma

vez que os dados recolhidos a partir deste servirão de *input* ao modelo, sendo modelados através de uma distribuição de probabilidade (teórica ou empírica). O modelo deve ter um nível de detalhe suficiente para responder aos pressupostos e objetivos definidos no primeiro passo (Law e Kelton, 1991). Contudo, modelos demasiado detalhados podem acrescentar custos sem garantir a melhoria na qualidade do *output* (Banks, 1998).

3º passo – Validação do modelo conceptual: consiste em comparar o modelo conceptual com o sistema real e concluir se o primeiro representa devidamente o segundo, com base nos pressupostos definidos no 1º passo. Segundo Law e Kelton (1991) a validação do modelo (conceptual e computacional) deve ser feita ao longo do estudo de simulação. É condição necessária ao desenvolvimento de um modelo válido o envolvimento de pessoas, quer intimamente ligadas ao processo, quer com o decisor, de forma a conceber um modelo credível. É nesta fase que podem ser detetados erros no modelo conceptual, impedindo, assim, o desenvolvimento de um modelo computacional que não represente adequadamente a realidade. Se for esse o caso, então dever-se-á retornar ao segundo passo, ou até mesmo ao primeiro se a formulação do problema não for a mais adequada.

4º passo – Desenvolvimento e verificação do modelo computacional: consiste na “tradução” do modelo conceptual para a linguagem do *software* de simulação selecionado para o efeito, de forma a simular o funcionamento do sistema real (gerar *outputs*). A verificação do modelo computacional passa por garantir que este funciona conforme o esperado (Chung, 2003), isto é, assegurar que as várias relações lógicas e matemáticas estão de acordo com as estabelecidas no modelo conceptual. É importante que a verificação do modelo seja um processo contínuo e não apenas executada após o desenvolvimento do modelo (Banks, 1998). Verificar o modelo é afirmar que o modelo foi construído corretamente (Chung, 2003).

5º passo – Validação do modelo computacional: o modelo de simulação é considerado válido se representar devidamente o sistema real, para um dado nível de confiança (Chung, 2003). Esta validação poderá ser feita através da comparação do *output* do modelo com as medidas de desempenho do sistema real (denominada validação de resultados). Se os *outputs* do modelo forem considerados próximos dos do sistema, então, o modelo é considerado válido. Também será possível fazer uma análise de sensibilidade ao modelo que consiste em avaliar o efeito que pequenas alterações do *input* têm no *output*. Se se verificar uma grande alteração no *output*, poderá ser necessário encontrar uma melhor estimação do *input* (Law e Kelton, 1991). Portanto, validar o modelo significa construir o modelo correto (Chung, 2003).

6º passo – Desenho e análise de experiências: para cada cenário ou modelo alternativo, devem ser definidos os parâmetros da simulação, tais como, a duração da simulação, o número de replicações, o período de *warm-up* e as condições iniciais do sistema (se o estudo de simulação for do tipo *terminating*). Definidos os parâmetros, é possível realizar o estudo dos vários cenários ou modelos alternativos delineados no 1º passo e escolher o melhor de forma precisa e eficiente (Kelton *et al.*, 2004).

7º passo – Registo e apresentação dos resultados: como forma de concluir o estudo de simulação e possibilitar a utilização do modelo para trabalhos futuros, deve ser elaborado um relatório contendo o modelo conceptual, os pressupostos assumidos, uma descrição detalhada da programação do modelo, os resultados e conclusões finais do estudo de simulação. A animação do modelo é um fator fundamental para a sua credibilidade, já que possibilita ao decisor observar o funcionamento do sistema, potenciando a perpetuação do uso da simulação como uma ferramenta de suporte à tomada de decisão.

Uma vez definido o problema a ser estudado e recolhidos os dados necessários ao desenvolvimento (e consequente validação) do modelo, deve fazer-se uma análise estatística dos dados recolhidos, ou seja, deve fazer-se uma análise do *input*.

2.3.6. Análise do *Input*

O aspeto mais difícil de um estudo de simulação é a modelação do *input*. Para modelar o sistema, poder-se-á recorrer a dados históricos ou recolhê-los através da observação. Recolher dados suficientes em qualidade, quantidade e variedade é uma tarefa que consome muito tempo e, em alguns contextos, pode mesmo ser impossível, pelo que a utilização de dados históricos representa uma vantagem face à recolha de dados. Todavia, utilizar dados históricos pode ter alguns inconvenientes, nomeadamente, a precisão com que foram recolhidos ou o período de tempo a que se referem não ser representativo do sistema atual, o que pode comprometer a validade do estudo de simulação. Ao decidir recolher dados a partir do sistema, é conveniente seguir as seguintes sugestões para garantir a qualidade no ajustamento do *input* (Vincent, 1998):

- A dimensão da amostra deverá ser entre 100 a 200 observações: o decréscimo na qualidade da análise estatística para amostras inferiores a 100 observações é perceptível, já o ganho em qualidade para amostras superiores a 200 observações não é significativo;
- Precisão dos dados: o registo dos dados deve ter dois a três algarismos significativos em relação a um valor nominal. Por exemplo, para estudar o valor médio de uma característica em metros, é conveniente recolher dados até ao centímetro (ou mesmo milímetro);
- Para estudar tempos (de processamento ou de espera), deve-se registar as horas de início e de fim da atividade bem como calcular, manualmente ou com auxílio a um *software*, o tempo decorrido;
- Se se verificar alguma dependência temporal nos dados, estes devem ser recolhidos tendo em conta o seu período de observação.

Um passo fundamental no desenvolvimento de um modelo de simulação estocástico é representar as fontes de aleatoriedade do sistema em estudo, isto é, associar cada *input* a uma distribuição de probabilidade, teórica ou empírica (Gunes e Biller, 2010). Law e McComas (1999) identificam algumas fontes de aleatoriedade em sistemas produtivos, nomeadamente, chegadas de pedidos, componentes

ou matéria-prima; tempos de processamento, montagem ou inspeção; fiabilidade dos equipamentos; tempos de reparação de equipamentos e tempos de *setup*.

A escolha da distribuição de probabilidade para modelar um *input* pode ter um grande impacto no *output* da simulação e, necessariamente, na qualidade das decisões a tomar. Na recolha de dados existem três possíveis abordagens para a modelação do *input* (Law e Kelton, 1991):

1. Usar diretamente os dados recolhidos como *input* do modelo de simulação: apesar de ter como vantagem exigir menos esforço por parte do modelador, tem como limitação o facto de o modelo ser capaz de reproduzir apenas o que aconteceu historicamente;
2. Ajustamento dos dados a uma distribuição de probabilidade empírica: esta abordagem evita a limitação da primeira, uma vez que a distribuição empírica gera qualquer valor entre o máximo e o mínimo observados. Contudo, utilizar uma distribuição empírica para a modelação do *input* apresenta as seguintes limitações:
 - a. A distribuição empírica poderá apresentar características que não são representativas do processo em causa;
 - b. Não é possível gerar valores fora do intervalo de valores observados, isto é, não gera valores superiores e inferiores a um máximo e um mínimo observados, respetivamente;
 - c. O uso de uma distribuição empírica exige mais esforço em termos computacionais, pois é necessário calcular a probabilidade dos dados observados e a respetiva probabilidade acumulada.
3. Ajustamento dos dados a uma distribuição de probabilidade teórica: é a abordagem preferível, já que evita todas as limitações supramencionadas. Todavia, poderá não ser possível ajustar os dados a uma distribuição de probabilidade teórica, sendo que, nesse caso, deve-se recorrer a uma distribuição de probabilidade empírica ou tratar os dados separadamente.

De notar que para qualquer processo estocástico não existe um modelo verdadeiro para representar os dados: o objetivo na modelação do *input* é obter uma boa aproximação que capture as características principais do processo em estudo. Uma vez que se pretende associar os dados a uma distribuição de probabilidade teórica, a modelação do *input* resume-se, essencialmente, a três passos (Biller e Gunes, 2010):

1. Escolher uma (ou mais) distribuições de probabilidade, com base nas características físicas do processo e na análise gráfica dos dados: importa saber *a priori* se os dados são variáveis contínuas ou discretas, o que representam (tempos de processamento ou número de chegadas, por exemplo) e que valores podem tomar, isto é, se a distribuição correspondente deverá ser limitada ou ilimitada. A construção do histograma permite visualizar a forma da distribuição que está subjacente aos dados;

2. Determinar os parâmetros que caracterizam a distribuição candidata: escolha do método para estimação dos parâmetros da distribuição (o método da máxima verossimilhança, o método da estimação de momentos ou o método dos erros quadráticos mínimos são alguns dos que podem ser utilizados);
3. Verificar o ajustamento dos dados através de testes de hipóteses e verificar o ajustamento graficamente: o teste do qui-quadrado (QQ) e o teste do *Kolmogorov-Smirnov* (K-S) são os testes mais usados para verificar a qualidade de ajustamento dos dados. A análise do histograma, apesar de ser um método informal, poderá também fornecer informações úteis em relação à qualidade do ajuste.

Law (2009) refere dois erros comuns na modelação do *input* que merecem ser referidos para evitar estudos de simulação inválidos:

1. Substituir uma distribuição de probabilidade pelo seu valor médio: a causa deste erro pode ser a falta de conhecimento estatístico do responsável pela modelação ou a ausência de informações relativas à distribuição em causa, uma vez que apenas é conhecido o seu valor médio. Ao cometer este erro, são eliminadas as fontes de aleatoriedade do modelo, pelo que os resultados do estudo de simulação poderão não representar adequadamente a realidade;
2. Escolha errada na distribuição de probabilidade: para modelar tempos de processamento, por exemplo, deve-se optar por uma distribuição limitada (à esquerda), mesmo que os testes de ajustamento não rejeitem a hipótese de se tratar de uma distribuição ilimitada (normal, por exemplo), já que esta, por muito reduzida que seja a probabilidade, admite valores negativos.

Grande parte das técnicas estatísticas utilizadas no tratamento de dados assume que as observações são independentes (ou aleatórias) e identicamente distribuídas (IID). Assim, o primeiro passo no tratamento de dados é verificar a sua independência. O diagrama de dispersão (*scatter diagram*) é uma técnica gráfica que permite avaliar, informalmente, a independência dos dados (Law e Kelton, 1991). No Anexo A.2. apresenta-se uma breve explicação deste diagrama no que respeita à sua construção e interpretação.

Verificada a independência dos dados, o passo seguinte é construir um histograma para averiguar as distribuições candidatas à modelação do *input*. O histograma é um gráfico de barras que ilustra as frequências (absolutas ou relativas) da ocorrência dos valores de uma variável contínua ou discreta, fornecendo informações importantes sobre a dispersão e localização dos valores recolhidos (Pereira e Requeijo, 2012), dando uma visão da forma da distribuição de probabilidade subjacente aos dados (Law, 2009). Note-se que o histograma é muito sensível à forma como estão agrupados os dados, pelo que a sua interpretação pode ser diferente para diferentes amplitudes das classes (Biller e Gunes, 2010). No Anexo A.3. são apresentadas as etapas necessárias à construção de um histograma.

Se um histograma sugerir uma distribuição de probabilidade com mais de um valor máximo, isto é, multimodal, ou um conjunto de valores que aparenta ser significativamente diferente das restantes observações, poderá utilizar-se uma distribuição empírica para representar esse conjunto de dados.

Como alternativa, Kelton *et al.* (2004) sugerem a divisão do conjunto de dados em duas (ou três, no máximo) populações distintas e associar cada uma a uma distribuição de probabilidade teórica. No Anexo A.4. encontram-se algumas instruções em relação a esta abordagem.

Construído o histograma, deve decidir-se a que família de distribuições os dados poderão pertencer com base na sua observação, sem a preocupação de determinar ainda quais os parâmetros da distribuição candidata. No Anexo A.5. são apresentadas algumas informações relativas às distribuições de probabilidade teóricas mais utilizadas.

Por fim, recorre-se a testes de hipóteses para averiguar formalmente se o conjunto dos dados IID resulta de uma dada distribuição de probabilidade. Estes testes têm como finalidade verificar a hipótese de que a distribuição candidata serve para representar estatisticamente os dados. Assim, a hipótese nula pode ser definida como (Law, 2009):

H_0 : As observações IID seguem uma dada distribuição de probabilidade.

H_1 : As observações IID não seguem uma dada distribuição de probabilidade.

O facto de não se rejeitar a hipótese nula não implica a sua aceitação, isto é, o teste apenas revela que não deve ser rejeitada a hipótese de os dados seguirem uma certa distribuição, para um certo nível de confiança. No entanto, os testes do QQ e K-S revelam-se pouco poderosos para amostras de dimensão reduzida a moderada (amostras de dimensão inferior a 30 observações), pois não são muito sensíveis a pequenas divergências entre os dados e os valores da distribuição candidata. Quer isto dizer que os testes devem ser utilizados para detetar diferenças grosseiras entre os dados e a distribuição de probabilidade candidata. Por outro lado, os testes tendem a rejeitar a hipótese nula quando a dimensão da amostra é muito grande. Uma vez que a hipótese nula nunca é exatamente verdadeira, qualquer discrepância subtil entre os valores recolhidos e os valores da distribuição candidata poderá levar à rejeição da hipótese nula (Law e Kelton, 1991). Dadas as limitações dos testes de ajustamento, deve-se corroborar o seu resultado através de ferramentas gráficas, como, por exemplo, o histograma (Biller e Gunes, 2010).

Portanto, os testes de ajustamento rejeitam a hipótese nula quando existem provas evidentes de que a distribuição candidata não representa adequadamente os dados. Muitos *softwares* (incluindo o *software* ARENA) usam como valor da estatística de teste o *Corresponding p-value* para averiguar a qualidade do ajustamento dos dados a uma dada distribuição de probabilidade. O nível de significância (α) corresponde à probabilidade de rejeitar a hipótese nula quando esta não é falsa (erro do Tipo I). Assim, o *p-value* representa o nível de significância para o qual se rejeitaria a hipótese nula dado o valor da estatística de teste (Banks *et al.*, 2014). Valores de *p-value* superiores ao nível de significância suportam a não rejeição da hipótese nula (Biller e Gunes, 2010). Logo, um elevado *p-value* tende a indicar de que se trata de um ajustamento adequado, ou seja, teria de se admitir uma grande probabilidade de erro para rejeitar a hipótese nula. De forma análoga, um baixo *p-value* sugere um fraco ajustamento (Banks *et al.*, 2014).

Os testes mais utilizados são os testes do QQ e de K-S. O primeiro avalia a aderência entre uma distribuição de frequências de uma dada amostra e uma distribuição teórica (Pereira e Requeijo, 2012). À semelhança do histograma, o teste do QQ apresenta como principal limitação o facto de depender da determinação do número e dimensão das classes (Law e Kelton, 1991). Alterações no número de classes e na sua amplitude alteram o valor da estatística de teste do QQ. Logo, a hipótese nula poderá não ser rejeitada se os dados estiverem agrupados de uma forma, mas poderá ser rejeitada se os dados forem agrupados de uma outra forma. Além disso, a distribuição da estatística de teste do QQ é apenas uma aproximação e o poder do teste é, ocasionalmente, fraco (Banks *et al.*, 2014). Por poder (*power*) de um teste estatístico define-se a probabilidade de o teste rejeitar a hipótese nula quando esta é falsa. O poder de um teste estatístico está associado ao erro do Tipo II (β) que corresponde à probabilidade de não rejeitar a hipótese nula quando esta é falsa. Logo, o poder de um teste estatístico pode ser definido como $1 - \beta$ (Smith, 2015).

O teste de K-S verifica o ajustamento da função de distribuição de probabilidade da amostra (distribuição empírica dos dados) à função de distribuição de probabilidade da população (a distribuição teórica) (Pereira e Requeijo, 2012). É particularmente útil quando a dimensão da amostra é reduzida e quando não foram estimados quaisquer parâmetros da distribuição. Todavia, este teste tem como principal limitação o facto de não ser tão sensível a discrepâncias de valores nas “caudas” das distribuições (Banks *et al.*, 2014) e, além disso, impõe distribuições populacionais contínuas e completamente especificadas (Pereira e Requeijo, 2012). Ainda assim, o teste do K-S apresenta globalmente vantagens em relação ao teste do QQ pois, dadas as limitações de ambos, o teste do K-S é mais potente do que o teste do QQ na maioria das situações (Pereira e Requeijo, 2012).

Para a modelação da chegada de entidades ao modelo, importa conhecer o que é um processo de *Poisson*, pois é o método mais comum para modelar as chegadas de entidades ao modelo. Para a descrição de um processo de *Poisson*, sugere-se a consulta do Anexo A.6. para uma explicação do processo de modelação de chegadas de entidades ao modelo.

Em algumas situações, não é possível recolher dados a partir do sistema, seja por este não existir, seja pelo processo de recolha ser limitado em termos de tempo e custo. Assim, devem ser assumidos alguns pressupostos e simplificações para que se defina uma dada distribuição de probabilidade capaz de modelar os dados *ad hoc* (Kelton *et al.*, 2004). Neste caso, terão de ser assumidos alguns pressupostos em relação à distribuição de probabilidade subjacente aos dados. Para uma descrição detalhada dos pressupostos a assumir nesta situação, consultar o Anexo A.7.

Para auxiliar na análise estatística dos dados recolhidos, utilizou-se o *Input Analyzer* do software ARENA cuja descrição se encontra no Anexo A.8.

Concluída a análise do *input* e desenvolvido o modelo de simulação, estão reunidas as condições para se iniciar o estudo de simulação. Contudo, para tirar conclusões a partir dos *outputs* gerados pelo modelo, é necessário definir os parâmetros de simulação, tais como, a duração da corrida de simulação, o número de replicações (que corresponde ao número de observações do *output*) e o período de

warm-up que segundo Kelton *et al.* (2004) corresponde ao período durante o qual não são registadas quaisquer estatísticas do modelo.

2.3.7. Análise do *Output*

Um modelo de simulação, como já foi referido, fornece apenas estimativas das medidas de desempenho e, além do mais, uma corrida de simulação não gera dados IID, pelo que as técnicas clássicas de estatística não podem ser diretamente aplicadas (Alexopoulos e Seila, 1998). Assim, para validar o modelo de simulação, deve ser feita uma análise do seu *output* de forma a determinar os parâmetros da simulação necessários para este ser capaz de gerar dados IID, permitindo, desse modo, comparar estatisticamente as medidas de desempenho do modelo e do sistema (Law e Kelton, 1991).

Na análise do *output* de um estudo de simulação é necessário distinguir entre valores gerados ao longo de uma replicação (*within replication*) e de uma replicação (*across replication*), e compreender as respetivas propriedades. Considere-se uma medida de desempenho Y (tempo de permanência no sistema, por exemplo) que se pretende analisar através de um estudo de simulação. Considere-se, ainda, os dados da Tabela 2.2 para R replicações (Banks *et al.*, 2014):

Tabela 2.2 – Dados de cada replicação e entre replicações.
(Adaptada de: Banks *et al.* (2014)).

Replicação	Valores ao longo da replicação				Valores da replicação
1	Y_{11}	Y_{12}	\dots	Y_{1n_1}	\bar{Y}_1, S_1^2, h_1
2	Y_{21}	Y_{22}	\dots	Y_{2n_2}	\bar{Y}_2, S_2^2, h_2
\vdots	\vdots	\vdots	\dots	\vdots	\vdots
R	Y_{R1}	Y_{R2}	\dots	Y_{Rn_R}	\bar{Y}_R, S_R^2, h_R
					$\bar{\bar{Y}}, S^2, h$

Os valores das replicações são calculados através dos valores gerados ao longo das respetivas replicações, ou seja, \bar{Y}_i corresponde à média amostral das observações Y_i (replicação i com n_i observações); S_i^2 corresponde à variância amostral e h_i corresponde ao *half width* (precisão absoluta, segundo Chung (2003)) que se traduz em metade da amplitude do intervalo de confiança em torno do valor médio (equação 2.1) (Banks *et al.*, 2014):

$$h_i = t_{1-\frac{\alpha}{2}, n_i-1} \times \frac{S_i}{\sqrt{n_i}} \quad (2.1)$$

Em que, $t_{1-\frac{\alpha}{2}, n_i-1}$ corresponde ao valor crítico da distribuição *t-student* para um nível de confiança de $1 - \alpha$ e $n_i - 1$ graus de liberdade;

Os valores ao longo da replicação são gerados a partir da mesma sequência de números aleatórios, pelo que não são nem independentes, nem identicamente distribuídos. Logo, as ferramentas estatísticas que assumem a independência dos dados não podem ser aplicadas (Law e Kelton, 1991). No entanto, as médias amostrais das replicações são IID: são independentes porque foram geradas a partir de diferentes sequências de números aleatórios; são identicamente distribuídas porque foram geradas através do mesmo modelo de simulação; e tendem a ser normalmente distribuídas porque

resultam de médias de dados gerados dentro de uma replicação, o que implica que o intervalo de confiança definido por $\bar{Y} \pm h$ é uma boa estimacão do valor médio da medida de desempenho Y para um certo nível de confiança (Banks *et al.*, 2014).

Por conseguinte, para efetuar um estudo estatístico com dados IID, devem ser feitas R replicações num modelo de simulacão. As medidas de desempenho são determinadas com base nas R replicações (Banks *et al.*, 2014). Cada medida de desempenho tem associada a média (\bar{Y}), a variacão (S^2) e o *half width* (h) (equacão 2.2-2.4).

$$\bar{Y} = \frac{1}{R} \sum_{i=1}^R \bar{Y}_i \quad (2.2)$$

$$S^2 = \frac{1}{R-1} \sum_{i=1}^R (\bar{Y}_i - \bar{Y})^2 \quad (2.3)$$

$$h = t_{1-\frac{\alpha}{2}, R-1} \times \frac{S}{\sqrt{R}} \quad (2.4)$$

Com base nestas medidas, é possível estimar o número de replicações necessárias para um dado erro admissível. O número de replicações, idealmente, seria infinito, mas como tal não é possível, existem algumas aproximações para a sua estimativa.

Em primeiro lugar, deve correr-se a simulacão para um número arbitrário de replicações (vários autores, Kelton *et al* (2004) e Chung (2003), recomendam dez). Depois, é calculado o valor do *half width* (o software ARENA calcula-o automaticamente). À partida, o valor de *half width* é superior ao pretendido. Note-se que a escolha arbitrária do valor do *half width* (que pode ser encarado enquanto um desvio em valor absoluto em relação à média amostral \bar{Y}) requer alguma familiaridade com o sistema para o definir adequadamente. Importa referir que neste tipo de aproximações deve ser adotada uma abordagem conservadora, pelo que o arredondamento do cálculo do número de replicações deve ser feito por excesso (Chung, 2003).

Para se obter o *half width* pretendido, basta substituí-lo na equacão (2.4) e resolvê-la em ordem a R , obtendo-se a equacão (2.5). A dificuldade desta aproximação prende-se com o facto de não se resolver verdadeiramente a equacão em ordem a R , uma vez que os valores de $t_{1-\frac{\alpha}{2}, R-1}$ e de S também dependem do valor de R (Kelton *et al.*, 2004).

$$R \cong \left(\frac{t_{1-\frac{\alpha}{2}, R-1} \times S}{h} \right)^2 \quad (2.5)$$

Para obter uma aproximação menos grosseira, é possível substituir o valor de $t_{1-\frac{\alpha}{2}, R-1}$ pelo valor $z_{1-\frac{\alpha}{2}}$ da distribuição normal reduzida (que são próximos para valores de $R \geq 30$), assumindo que a estimativa do desvio padrão S será aproximadamente igual para amostras de dimensão superior (regra geral, para maiores valores de R , S tende a diminuir). Assim, o número de replicações R necessário para atingir o *half width* pretendido pode ser calculado através da equacão (2.6) (Kelton *et al.*, 2004):

$$R \cong \left(\frac{z_{1-\frac{\alpha}{2}} \times S}{h} \right)^2 \quad (2.6)$$

Em que, S é o desvio padrão amostral para as dez replicações iniciais.

Kelton *et al.* (2004) sugerem outra aproximação mais fácil, mas ligeiramente diferente da anterior definida pela equação (2.7):

$$R \cong R_0 \times \left(\frac{h_0}{h}\right)^2 \quad (2.7)$$

Em que, R_0 corresponde ao número inicial de replicações (dez), h_0 ao *half width* obtido pelas replicações iniciais e h é o valor do *half width* que se pretende atingir.

A equação (2.5) é sempre maior do que a equação (2.6) porque usa o valor $t_{1-\frac{\alpha}{2}, R-1}$ em vez de $z_{1-\frac{\alpha}{2}}$.

Note-se que para reduzir o *half width* para metade do valor inicial, são necessárias quatro vezes mais observações, isto é, replicações (Kelton *et al.*, 2004).

Chung (2003) sugere uma aproximação do número de replicações através da precisão relativa que corresponde à comparação do valor do *half width* em relação à média amostral do conjunto das dez observações teste, traduzida matematicamente por:

$$Precisão\ relativa = \frac{h}{\bar{y}} = \frac{t_{1-\frac{\alpha}{2}, R-1} \times \frac{S}{\sqrt{R}}}{\bar{y}} \quad (2.8)$$

Dá-se preferência a esta abordagem porque não é necessário definir arbitrariamente uma precisão absoluta. Para uma análise estatística robusta, o *half width* deve ser relativamente “pequeno” em relação à média amostral. Vários autores (Kelton *et al.* (2004) e Chung (2003)) recomendam o valor de 10% em relação à média amostral. Para estimar o número de replicações R através da precisão relativa, basta resolver a equação (2.8) em ordem a R , obtendo-se a equação (2.9):

$$R \cong \left(\frac{t_{1-\frac{\alpha}{2}, R-1} \times S}{Precisão\ relativa \times \bar{y}} \right)^2 \quad (2.9)$$

Uma vez calculado o número de replicações, poderá então definir-se um intervalo de confiança centrado no valor médio, definido por:

$$IC_{(1-\alpha)\%}(\mu) = \left[\bar{y} \pm t_{1-\frac{\alpha}{2}, R-1} \times \frac{S}{\sqrt{R}} \right] \quad (2.10)$$

O intervalo de confiança pode ser interpretado como um intervalo “aleatório” que, com 95% de probabilidade, contém o valor médio μ (Kelton, *et al.*, 2004).

Determinado o número de replicações a executar num modelo de simulação, procede-se com a validação de resultados do modelo, através da sua comparação com as medidas de desempenho do sistema. Esta abordagem, intuitivamente, sugere o uso de um teste de hipóteses para verificar se existe uma diferença significativa entre o valor médio da medida de desempenho do sistema e o valor médio da medida de desempenho determinada pela corrida das R replicações no modelo de simulação:

$$H_0: \mu_S = \mu_R \Leftrightarrow \mu_S - \mu_R = 0$$

$$H_1: \mu_S \neq \mu_R \Leftrightarrow \mu_S - \mu_R \neq 0$$

Em que, μ_S é o valor médio da medida de desempenho do sistema e μ_R é o valor médio da medida de desempenho determinada pela corrida das R replicações no modelo de simulação.

Contudo, Law e Kelton, 1991 sugerem a utilização de intervalos de confiança, em vez de um teste de hipóteses pelos seguintes motivos:

1. O modelo é apenas uma aproximação do sistema real, logo, H_0 será falsa na maioria das situações;
2. Um intervalo de confiança fornece mais informações do que o teste de hipótese correspondente. Se o teste de hipótese indica que $\mu_S \neq \mu_R$, então, o respetivo intervalo de confiança fornece esta informação e ainda indica a magnitude de quanto μ_S difere de μ_R .

Assim, suponha-se que é construído um intervalo para $(1 - \alpha)\%$ de confiança para a diferença dos valores médios, definido por:

$$IC_{(1-\alpha)\%}(\mu_S - \mu_R) = [\text{infe}(\alpha), \text{supe}(\alpha)]$$

Em que, $\text{infe}(\alpha)$ é o limite inferior do intervalo e $\text{supe}(\alpha)$ é o limite superior do intervalo.

Se $0 \notin [\text{infe}(\alpha), \text{supe}(\alpha)]$, então a diferença dos valores médios μ_S e μ_R é estatisticamente significativa, o que equivale a rejeitar a hipótese nula ($H_0: \mu_S = \mu_R$) de que os valores médios são estatisticamente semelhantes, para um nível de significância α . Esta condição não implica a invalidação do modelo: se a magnitude (comprimento do intervalo) da diferença for suficientemente “grande”, então o modelo pode ser considerado inválido. Classificar como “grande” a dimensão do intervalo de confiança é uma decisão de carácter subjetivo e, como tal, deverá ser feita por alguém que seja conhecedor do processo e pelo próprio modelador. Caso se verifique $0 \in [\text{infe}(\alpha), \text{supe}(\alpha)]$, então a diferença dos valores médios não é estatisticamente significativa para um nível de significância α , pelo que, a validação do modelo é imediata (Law e Kelton, 1991).

Para a determinação do intervalo de confiança $IC_{(1-\alpha)\%}(\mu_S - \mu_R)$, podem ser utilizados testes paramétricos (em particular, o teste com base no valor crítico da distribuição *t* de *student*) que assumem o pressuposto de que os dados provêm de uma distribuição de probabilidade conhecida (Normal, por exemplo) (Kvam e Vidakovic, 2007). De facto, pelo Teorema do Limite Central, se a média das observações resulta de uma amostra aleatória de dimensão relativamente grande (maior ou igual do que 30 observações), então, pode assumir-se que a população da média das amostras é aproximadamente normal. Assim, é de esperar que estes testes assumam pressupostos de normalidade dos dados para uma dimensão da amostra maior ou igual a 30 observações para a estimação do intervalo de confiança $IC_{(1-\alpha)\%}(\mu_S - \mu_R)$.

Ao utilizar um teste paramétrico para comparar os valores médios de duas medidas de desempenho de dois cenários ou modelos para um dado nível de confiança, pode recorrer-se à ferramenta do *software* ARENA *Output Analyzer*. No Anexo A.9., encontra-se uma breve explicação sobre a utilização

desta ferramenta para a determinação do intervalo de confiança entre os valores médios de duas medidas de desempenho.

Contudo, quando a dimensão da amostra é reduzida, o pressuposto da normalidade pode não ser verificado, devendo-se, nesse caso, recorrer a um teste não paramétrico, no qual, não são assumidos quaisquer pressupostos sobre a distribuição de probabilidade subjacente à população da qual provêm os dados (Kvam e Vidakovic, 2007). Um teste não paramétrico, por requerer menos pressupostos acerca dos dados, é mais robusto do que um teste paramétrico (Sprenst e Smeeton, 2007). Um teste estatístico diz-se robusto se não for particularmente sensível a alterações nos dados ou nos seus pressupostos (Smith, 2005). Contudo, um teste paramétrico é mais poderoso do que um teste não paramétrico por assumir mais pressupostos acerca dos dados (Kvam e Vidakovic, 2007).

O teste do *Mann-Whitney* (ou *Mann-Whitney U Test*) é o teste não paramétrico homólogo ao teste paramétrico para testar a hipótese de a diferença de as duas médias serem significativamente diferentes (Kvam e Vidakovic, 2007) cujas hipóteses são (Sprenst e Smeeton, 2007):

$$H_0: X_{0,5} - Y_{0,5} = 0$$

(A mediana das populações X e Y é idêntica)

$$H_1: X_{0,5} - Y_{0,5} > 0$$

(A mediana da população X é superior à de Y).

No Anexo A.10., é possível encontrar o procedimento para o teste do *Mann-Whitney U Test*.

O método de validação de resultados através de intervalos de confiança é igualmente válido para a comparação entre dois cenários ou modelos, sendo as regras de decisão em todo análogas. Note-se que para comparar dois ou mais cenários (ou modelos), devem ser determinadas para cada alternativa o número de replicações e deve-se escolher o máximo obtido e utilizar esse valor para todos os cenários (ou modelos) para compará-los estatisticamente. Portanto, o número de replicações R para todos os cenários ou modelos é determinado através (Chung, 2003):

$$R = \max_{0 \leq i \leq n} \{R_i\} \quad (2.12)$$

Em que, R_i é o número de replicações do cenário ou modelo i (obtido através de uma das aproximações supramencionadas) e n é o número de cenários ou modelos a serem comparados.

Uma vez que o estudo de simulação para o presente caso de estudo será do tipo *steady-state*, importa conhecer o período de *warm-up* de forma a atenuar os efeitos das condições iniciais das medidas de desempenho no modelo. Durante este período, não são recolhidas quaisquer estatísticas do modelo, portanto, os relatórios estatísticos gerados pelo *software* ARENA apenas evidenciam as estatísticas de desempenho no estado estacionário, falando-se, então, em replicações truncadas. Note-se que, à semelhança da determinação do número de replicações nos cenários ou modelos alternativos, deve ser escolhido o máximo dos períodos de *warm-up* entre os vários (Kelton *et al.*, 2004). Para a determinação do período de *warm-up*, pode recorrer-se também à ferramenta do *software* ARENA

Output Analyzer. Os procedimentos a executar nesta ferramenta para a determinação do período de *warm-up* encontram-se também no Anexo A.9.

Assim, determinado o período de *warm-up* (que deve ser incluído na duração da simulação), a duração da corrida de simulação e o número de replicações, está-se em condições de analisar estatisticamente o modelo de simulação.

Para a comparação de vários cenários ou modelos alternativos (ou seja, fazer um desenho de experiências), o *software* ARENA dispõe de outra aplicação, o Processo *Analyzer* (PAN). Através do PAN, é possível comparar estatisticamente os vários cenários ou modelos alternativos e identificar o mais favorável (Kelton *et al.*, 2004). Uma breve explicação sobre esta ferramenta pode ser encontrada no Anexo A.11.

2.4. Síntese do capítulo

No presente capítulo, foi abordada de uma forma breve a origem do PL, bem como os seus princípios e algumas das ferramentas associadas. De seguida, foi abordada a ferramenta de simulação como uma alternativa ao VSM, pois não só reunia os benefícios da segunda, como ainda, superava as suas limitações. Por conseguinte, foi feito um enquadramento da ferramenta de simulação, foram descritos os objetivos, as vantagens e a metodologia a adotar num estudo desta natureza. Por fim, foram abordados os aspetos relativos aos resultados de um estudo de simulação, nomeadamente, a análise do *input* e do *output*. Assim, estão reunidas as condições para fazer um estudo de simulação do sistema.

3. Caraterização do caso de estudo

A presente dissertação incide no estudo do processo produtivo da oficina Caetano Colisão que pertence à Caetano Retail, organização que agrega as várias organizações do Grupo Salvador Caetano SGPS (Sociedade Gestora de Participações Sociais), SA (Sociedade Anónima) que desenvolvem a atividade de distribuição e reparação automóvel de diversas marcas em Portugal. A oficina Caetano Colisão é especializada em sinistros automóveis e localiza-se no complexo da Caetano Retail no concelho de Sintra, em Rio de Mouro.

3.1. Apresentação do Grupo Salvador Caetano

O Grupo Salvador Caetano (GSC) é um grupo de referência no setor automóvel em Portugal. O GSC representa cerca de 20 marcas de automóveis, com especial destaque para a Toyota, primeira marca comercializada pelo GSC.

O GSC teve origem na “Martins, Caetano e Irmão, Lda”, fundada em 1946 pelo empreendedor Salvador Fernandes Caetano, cuja atividade era o fabrico de carroçarias para autocarros.

Em 1968, o negócio de Salvador Caetano teve um enorme impulso quando conseguiu tornar-se o representante exclusivo da Toyota em Portugal, tendo a organização sido redenominada para “Toyota Caetano Portugal, SA”. Em 1971, Salvador Caetano inaugura uma unidade de montagem de automóveis em Ovar, considerada nessa altura uma unidade *state of the art*.

A partir de 1971, o GSC iniciou a sua expansão territorial, tanto interna como internacionalmente, e a diversificação de produtos e atividades.

Atualmente, a atividade do GSC abrange quatro áreas de negócio, i) indústria, ii) retalho, iii) energia e iv) serviços, continuando a ser um grupo vocacionado para o setor automóvel.

O GSC fatura 1,9 milhares de milhões de euros, emprega mais de 5,5 milhares de colaboradores e inclui mais de 100 organizações em 3 continentes, Europa, Ásia e África.

3.1.1. *Sub-holdings* do Grupo Salvador Caetano

A organização mãe ou *holding* do GSC é a “Grupo Salvador Caetano (SGPS), SA” que é responsável pela gestão das participações nas organizações que constituem o GSC, na definição da estratégia e na coordenação de todas as áreas de negócio. As quatro áreas de negócio são geridas por quatro *sub-holdings*, nomeadamente:

1. Toyota Caetano Portugal: *sub-holding* responsável pela distribuição e representação automóvel da marca Toyota, nomeadamente importação e retalho;
2. Salvador Caetano Indústria: *sub-holding* responsável pela área industrial do grupo, nomeadamente, fabrico de carroçarias e autocarros e sua comercialização;

3. Salvador Caetano Auto: *sub-holding* responsável pelo negócio de retalho automóvel multimarca no mercado ibérico. Em Portugal, comercializa ou tem pontos de assistência das seguintes marcas automóveis: Alfa Romeo, Audi, BMW, Chevrolet, Chrysler, Citroën, Dacia, Daihatsu, Dodge, Fiat, Ford, Honda, Hyundai, Jeep, Kia, Lancia, Lexus, Maybach, Mazda, Mercedes-Benz, MINI, Nissan, Opel, Peugeot, Renault, Seat, Skoda, Smart, Tata, Toyota e Volkswagen;
4. Salvador Caetano Capital: *sub-holding* responsável pela atividade do grupo na área das energias renováveis e noutras áreas de investimento, nomeadamente, nas tecnologias da informação.

A oficina Caetano Colisão que será o objeto de estudo da presente dissertação depende da organização Caetano Retail que, por sua vez, é gerida pela *sub-holding* Salvador Caetano Auto do GSC (Figura 3.1).

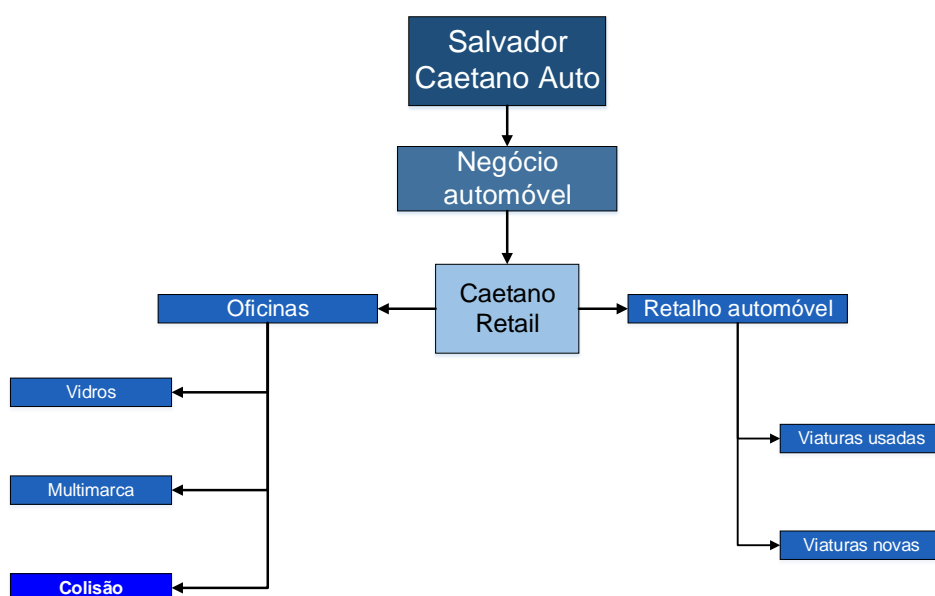


Figura 3.1 – Organização da Salvador Caetano Auto.

3.2. Entrada em produção

Cerca de 97% dos clientes que procuram a oficina Caetano Colisão estão ao abrigo da sua companhia de seguros que irá cobrir parte ou a totalidade da reparação do sinistro. Assim, existem alguns acordos entre a Caetano Colisão e determinadas companhias de seguros que preveem a cedência de uma viatura de cortesia (viatura da Caetano Colisão cedida ao cliente durante o período de reparação). As despesas associadas são suportadas ou por ambas as partes ou pela companhia de seguros. Atrasos na produção são da inteira responsabilidade da oficina, pelo que cumprir prazos de entrega, garantindo a satisfação do cliente, são fatores que potenciam uma boa imagem da oficina, pelo que, o processo produtivo merece ser estudado de forma a torná-lo mais eficaz e, consequentemente, mais eficiente.

A viatura sinistrada antes de entrar em produção deve ser inspecionada para ser feita a identificação dos danos resultantes do sinistro. Esta intervenção de diagnóstico designa-se por Peritagem. A estimativa da duração e do custo da intervenção é da responsabilidade da Orçamentação.

A burocracia relativa a todos os aspetos da reparação da viatura denomina-se de processo da viatura. Nele estão contidas as informações relativas aos dados do cliente, a instruções de reparação da viatura, a listagem de componentes, ao orçamento da reparação, entre outras.

Se o cliente aceitar o orçamento proposto, o processo da viatura segue para o Planeamento, onde é feita a calendarização das reparações.

As intervenções a fazer numa viatura podem ser de diagnóstico, reparação ou substituição. A intervenção é de diagnóstico quando o objetivo é averiguar a dimensão dos danos; de reparação quando existe a possibilidade de recuperar as características funcionais de um componente, tornando-o novamente eficaz; e de substituição quando não há a possibilidade de recuperar as características funcionais do componente.

3.2.1. Peritagem

A Peritagem é uma intervenção de diagnóstico que consiste em avaliar os danos resultantes do sinistro automóvel de forma a estimar o custo e o tempo associado à reparação. É feita pelos orçamentistas da oficina em conjunto com o perito da companhia de seguros do cliente.

O cliente leva a sua viatura junto da Receção e preenche o Dossier da Colisão, documento que contém os seus dados e os da viatura, bem como os danos reportados pelo mesmo. O perito da companhia de seguros do cliente e o orçamentista da Caetano Colisão reúnem-se para avaliarem os danos causados pelo sinistro. Procede-se a uma desmontagem preliminar do(s) componente(s) danificado(s) com a finalidade de verificar a existência de estragos internos. Os danos são apurados por ambas as partes e são feitos dois orçamentos em paralelo que serão depois comparados de forma a haver um consenso.

Se os danos derivados do sinistro impossibilitarem a viatura de circular na via pública, esta é considerada imobilizada. A imobilização implica que a viatura tenha de aguardar componentes de substituição ou no parque do complexo ou, se entrar em produção, na oficina. Caso a viatura esteja livre de circular, o cliente poderá recolhê-la aquando da conclusão do orçamento.

3.2.2. Orçamentação

Concluída a Peritagem, quer o perito da companhia de seguros, quer o perito da Caetano Colisão (orçamentista) procedem ao orçamento da reparação. O orçamentista deve fazer a identificação de eventuais componentes de substituição e estimar as horas de trabalho nas secções de chapa e pintura e o custo da intervenção, utilizando, para tal, o *software* AUDATEX.

Após o diagnóstico dos estragos, o orçamentista insere os dados da viatura no *software* AUDATEX e este devolve uma listagem de todos os seus componentes, da qual, deve seleccionar os danificados, especificando se se trata de uma reparação ou de uma substituição. Se o componente poder ser

recuperado, tratando-se, portanto, de uma reparação, os respetivos tempos de mão de obra são estimados pelo orçamentista. De outro modo, se se tratar de uma substituição de um ou mais componentes, as informações necessárias, tais como, os tempos de mão de obra, o custo da encomenda e o prazo de entrega são automaticamente gerados pelo *software* AUDATEX. O orçamentista é responsável pela encomenda dos componentes e de dar a conhecer ao responsável pelo Planeamento quanto tempo estes demorarão a chegar à oficina. Finalmente, estão reunidas as informações necessárias para definir o custo total da intervenção e a respetiva duração.

O orçamento da Caetano Colisão e o da companhia de seguros são comparados e ambas as partes decidem, unanimemente, quais as intervenções a fazer na viatura. Caso haja consenso, finaliza-se o processo de Peritagem e Orçamentação e o cliente fica a conhecer o orçamento da reparação. Não existindo consenso, deve ser feito um novo orçamento de acordo com o que a companhia de seguros sugere.

Se a companhia de seguros tiver autorizado previamente a intervenção aquando da Peritagem, o orçamento daí resultante diz-se definitivo e, uma vez concluído, o processo da viatura pode seguir para o Planeamento, onde será feito o agendamento da intervenção. Se não houver autorização, o orçamento diz-se condicionado e não será agendada qualquer intervenção até a companhia de seguros assim o autorizar.

3.2.3. Processo da viatura

Acordado um orçamento definitivo, o orçamentista cria dois documentos: a Folha de Obra e a Folha de Trabalhos. Ambos os documentos contêm as informações do cliente, da viatura, da intervenção e, ainda, a data de abertura do processo e a data prevista de entrada na oficina. O primeiro documento é de carácter provisório, pois pode estar sujeito a alterações quando o processo da viatura chega ao Planeamento. O segundo é destinado aos técnicos pois é anexado a outros documentos que contêm informações mais detalhadas da reparação da viatura, tais como, operações a executar, componentes necessários e o tempo estimado nas secções de chapa e pintura.

Assim, terminado o processo de Peritagem e Orçamentação, é gerado o processo da viatura que contém: Dossier da Colisão, Folha de Obra, Folha de Trabalhos, orçamentos da Caetano Colisão e da companhia de seguros, listagem dos componentes e fotocópias dos documentos de identificação do cliente e da viatura. O orçamentista cria uma ordem de reparação na plataforma informática SPIGA+ onde insere toda a informação resultante do processo de Peritagem e Orçamentação.

O processo da viatura está em condições de ser entregue ao responsável pelo Planeamento que agendará a entrada em produção.

O fluxograma apresentado na Figura 3.2 ilustra o processo de Peritagem e Orçamentação de uma viatura.

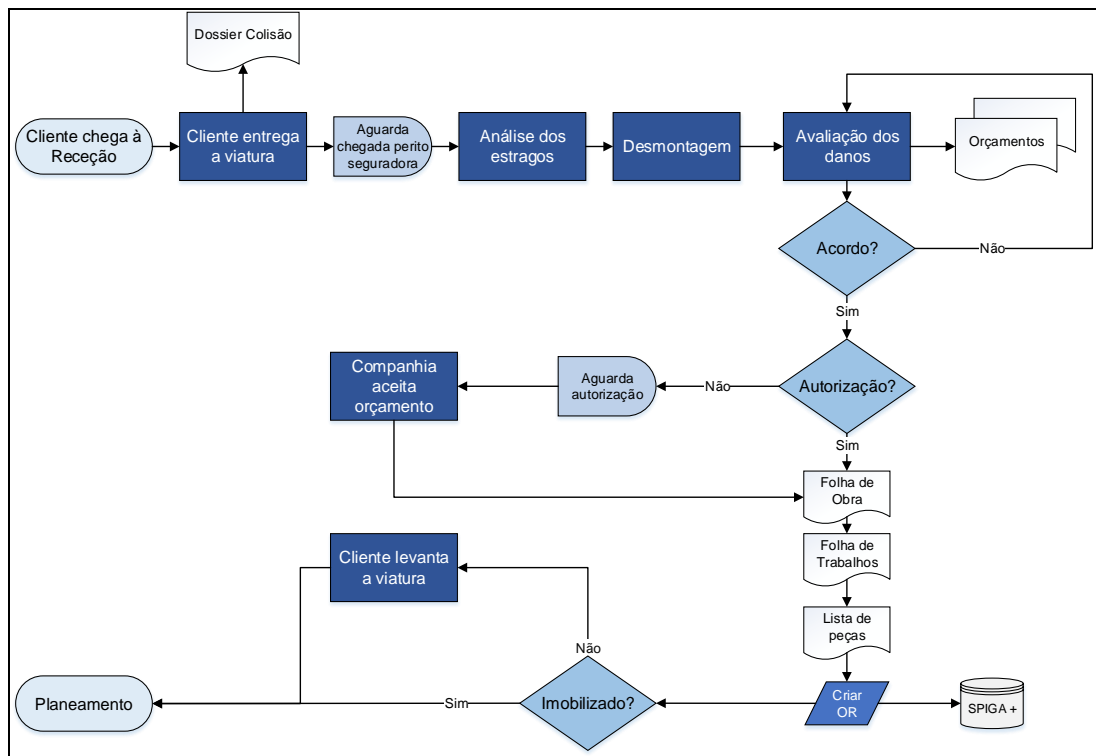


Figura 3.2 – Fluxograma Peritagem e Orçamentação.

3.2.4. Planeamento

O responsável pelo Planeamento agenda as entradas em produção tendo em conta a combinação dos seguintes fatores:

- Estado da viatura: se a viatura não estiver imobilizada, o cliente deve ser contactado para agendar a entrada da viatura em produção, isto é, na oficina. Se a viatura estiver imobilizada, o cliente não necessita de ser contactado, podendo a viatura entrar para produção quando for conveniente;
- Natureza da intervenção: se a viatura estiver imobilizada, poderá entrar para produção caso haja mão de obra disponível para adiantar trabalhos que não estejam sujeitos à chegada de novos componentes. Caso não esteja e se trate de uma substituição, a viatura terá de aguardar a chegada de componentes e, só após a sua chegada, o responsável poderá contactar o cliente para proceder ao agendamento da reparação da viatura. Tratando-se de uma reparação de um ou mais componentes, o responsável pode contactar o cliente para agendar a entrada em produção;
- Viatura de cortesia: existindo acordos entre a companhia de seguros e a Caetano Colisão, pode ser cedida ao cliente uma viatura de cortesia com a qual circulará durante o período de reparação. O período de circulação deve ser minimizado e os atrasos evitados pois os encargos financeiros por cada dia adicional em oficina são totalmente suportados pela oficina;

- Número de dias previstos em oficina: se o cliente beneficiar de uma viatura de substituição cedida pela companhia de seguros, os trabalhos a executar devem ser agendados para o início da semana para evitar a circulação da mesma durante o fim-de-semana, traduzindo-se num custo adicional para a companhia de seguros, o que prejudica a relação entre a oficina e a companhia de seguros. Caso o cliente circule com uma viatura de cortesia, o agendamento é feito no final da semana para garantir trabalho na secção de pintura no início da semana seguinte. Independentemente da cedência de uma viatura, trabalhos mais morosos devem ser agendados para o início da semana para serem concluídos até ao final dessa semana, evitando que a viatura em reparação permaneça nas instalações durante o fim-de-semana;
- Capacidade da oficina: o responsável pelo Planeamento deve considerar 80% da capacidade total das secções de chapa e pintura de maneira a agendar adequadamente a entrada de viaturas, sem que com isso exceda a capacidade disponível, o que implicaria atrasos na produção.

Assim, o Planeamento deve ser executado com o objetivo de minimizar os tempos improdutivos, maximizando a utilização dos recursos. Finalmente, esta fase dá-se por terminada quando é feita marcação a do dia e da hora de entrada da viatura na oficina.

3.3. Caraterização do sistema em estudo: oficina Caetano Colisão

Nos próximos subcapítulos, são descritos o Complexo da Caetano Retail em Rio de Mouro, Sintra e o processo de reparação das viaturas na oficina Caetano Colisão.

3.3.1. Caetano Retail: Complexo de Rio de Mouro

A Caetano Retail abrange sete áreas de negócio: i) automóveis novos, ii) automóveis usados, iii) assistência, iv) colisão, v) reparação, vi) substituição de vidros e vii) componentes e financiamento. Atualmente, a organização representa uma marca na comercialização de viaturas usadas e dezassete marcas automóveis. No Complexo da Caetano Retail em Rio de Mouro, estão presentes as marcas automóveis representadas por:

- Caetano Auto: representação oficial da marca Toyota em Portugal;
- Caetano Power: representação oficial da marca Nissan em Portugal;
- Caetano Drive: representação oficial da marca Volkswagen em Portugal;
- Caetano Motors: representação oficial da marca Peugeot em Portugal;
- Caetano Technik: representação oficial da marca Opel em Portugal;

Cada *stand* automóvel tem um espaço de venda de viaturas novas onde se prestam serviços pós-venda nos quais os clientes podem beneficiar de serviços de oficina, incluindo revisões e reparações de curta duração.

Para além das marcas supramencionadas, estão presentes também no Complexo:

- Car Plus (organização pertencente ao GSC responsável pela venda de viaturas usadas);
- Caetano Glass (reparação e substituição de vidros);
- Wash & Go (organização de limpeza automóvel subcontratada).

O edifício do Complexo da Caetano Retail está estruturado em quatro pisos, do -1 ao 2, nomeadamente:

- Piso -1: oficina de colisão;
- Piso 0: *stands* de venda e assistência automóvel, Car Plus, Caetano Glass, Wash & Go e Recepção da oficina de colisão;
- Piso 1: oficina especializada em Toyota e multimarca;
- Piso 2: terraço dedicado ao estacionamento de viaturas.

3.3.2. Oficina Caetano Colisão

A Caetano Colisão é uma entidade prestadora de serviços e foca a sua atividade na reparação de viaturas sinistradas. Localiza-se em Rio de Mouro, concelho de Sintra.

O seu objetivo é repor as condições iniciais das viaturas antes da ocorrência do sinistro.

A oficina está segmentada em três secções produtivas: mecânica, chapa e pintura. Em cada secção são executadas operações que acrescentam valor e estão sujeitas a elevados padrões de qualidade, de forma a garantir a conformidade na reparação dos danos peritados e a consequente satisfação do cliente.

A oficina da Caetano Colisão funciona 5 dias por semana, 8 horas por dia, das 8:30 às 17:30, com pausa de uma hora para o almoço. Os técnicos poderão, todavia, continuar o seu trabalho depois do horário de expediente, caso haja trabalho que o justifique e se a chefia o solicitar.

Para cada intervenção a fazer numa viatura, existe uma ordem de reparação na plataforma informática SPIGA +. O *software* é um *Dealership Management System*, sistema de informação que serve de apoio a toda atividade de produção. É utilizado por todos os intervenientes no processo desde os técnicos para o registo dos tempos de trabalho, aos técnicos comerciais para a faturação. Cada ordem de reparação contém a informação relativa aos trabalhos a executar como a previsão dos tempos de processamento em cada secção e a lista de eventuais componentes de substituição. Sempre que um técnico inicia ou conclui uma operação, deverá proceder ao registo da data e hora desse acontecimento na plataforma SPIGA + usando o computador da respetiva secção. Assim, é possível a chefia saber o tempo consumido em cada fase do processo e que técnicos intervieram nele, permitindo controlar a produção e estabelecer indicadores de eficiência para avaliação dos técnicos.

O processo de reparação de uma viatura envolve sempre as secções de chapa e pintura, mas pode não envolver a secção mecânica. Na secção de pintura são realizadas as operações que visam recuperar a cor da chapa antes da ocorrência do sinistro. Nesta secção, existe a distinção entre Linha Rápida ou Linha Longa, consoante a previsão do tempo de reparação da viatura seja curta (até 2 dias) ou longa (mais do que dois dias). Para o estudo em causa, foram consideradas apenas viaturas que passaram pela Linha Longa, o que significa que a previsão do tempo de reparação das viaturas era superior a dois dias.

Na secção de chapa são executadas as operações que visam a reparação e a substituição dos elementos da carroçaria danificados pelo sinistro como, por exemplo, a substituição de um para-choques ou o desempenamento de uma porta. Caso seja necessário fazer uma intervenção na viatura de natureza mecânica, esta é encaminhada para a respetiva secção onde serão executadas as operações que visam recuperar ou substituir componentes ou sistemas mecânicos e eletrónicos da viatura, como por exemplo, alinhar a direção, substituir pneus, suspensões ou baterias.

A Tabela 3.1 apresenta a capacidade disponível em cada secção produtiva de mecânica, de chapa e de pintura, calculada pelo produto do número de técnicos em cada secção pelo número de horas disponíveis (8 horas). A soma das capacidades corresponde à capacidade total da oficina.

Tabela 3.1 – Número de técnicos e capacidade em horas da oficina.

Secção	Número de técnicos	Capacidade (horas)
Mecânica	2	16
Chapa	9	72
Pintura	8	64
Total	19	152

O processo de reparação de uma viatura (processo produtivo) que não requeira trabalhos de natureza mecânica, envolve 7 fases sequenciais, nomeadamente, Desmontagem, Preparação de Pintura, Pintura, Montagem, Acabamento, Lavagem e Controlo.

A Tabela 3.2 indica as várias fases sequenciais do processo produtivo, a que secção pertencem, o número de postos de trabalho e o número de técnicos disponíveis para cada fase, sendo que um posto de trabalho alberga apenas uma viatura e é trabalhado por somente um técnico. A fase de reparação mecânica é omitida, pois não foi considerada para efeitos de estudo.

Portanto, uma viatura que dá entrada em oficina e que não necessite de reparações mecânicas, é encaminhada para a secção de chapa onde se dá a Desmontagem, correspondente à primeira fase do processo. Quer a fase de Desmontagem, quer a fase de Montagem são executadas na secção de chapa, pelo que, partilham os mesmos recursos, nomeadamente, o número de postos de trabalho (11) e o número de técnicos (9).

Tabela 3.2 – Fases sequenciais do processo.

Sequência da fase do processo	Fase do processo	Secção produtiva	Número de postos de trabalho	Número de técnicos disponíveis
1	Desmontagem	Chapa	11	9
2	Preparação de Pintura	Pintura	7	6
3	Pintura	Pintura	3	1
4	Montagem	Chapa	11	9
5	Acabamento	Pintura	4	1
6	Lavagem	Sem secção	-	-
7	Controlo de qualidade	Sem secção	1	1

Concluída a fase de Desmontagem, a viatura é encaminhada para a secção de pintura, onde se dão as fases de Preparação de Pintura e Pintura. Para a fase de Preparação de Pintura, existem 7 postos de trabalho onde os 6 técnicos podem trabalhar nas viaturas. Para a fase de Pintura, existem 3 estufas onde as viaturas podem ser pintadas, sendo que apenas 1 técnico é responsável pela aplicação da tinta.

A viatura regressa à secção de chapa para a fase de Montagem, seguida da fase de Acabamento que é também executada na secção de pintura. O posto de trabalho correspondente à fase de Acabamento, no qual trabalha apenas 1 técnico, é capaz de albergar 4 viaturas.

Após a fase de Acabamento, a viatura abandona temporariamente a oficina para visitar as instalações da Wash & Go, onde se dá a fase de Lavagem. Terminada a fase de Lavagem, a viatura regressa à oficina onde aguarda o responsável pela fase de Controlo. Nesta última fase, a viatura aguarda a fase de Controlo na rampa da oficina, não existindo um posto de trabalho específico para esta fase.

Na Figura 3.3 apresenta-se o *layout* da oficina no qual figuram as secções de chapa e pintura, a via central por onde as viaturas em reparação se deslocam, a rampa da oficina e a zona de entradas e de saídas de viaturas da oficina. Apesar de não estar à escala, a Figura 3.3 permite dar uma ideia das movimentações que ocorrem ao longo do processo, qual a área ocupada pela oficina e as zonas de espera das viaturas e/ou componentes.

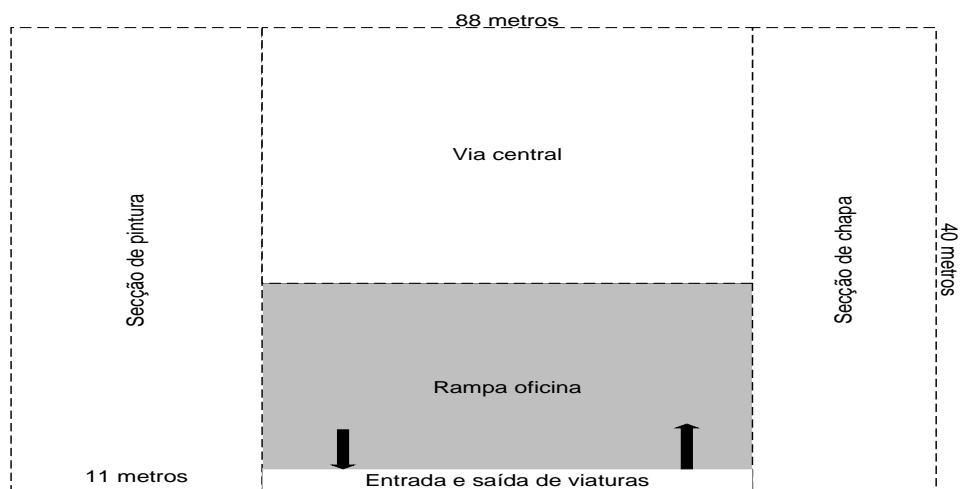


Figura 3.3 – Layout da oficina Caetano Colisão no piso -1.

A Tabela 3.3 representa a legenda da Figura 3.3, correspondente ao layout da oficina.

Tabela 3.3 – Legenda do layout da oficina.

Entrada e saída de viaturas	Local por onde as viaturas dão entrada e saída da oficina.
Rampa oficina	Local onde ocorre a fase de Controlo.
Via central	Área destinada para as movimentações de viaturas em reparação.
Secção de chapa	Área ocupada pela secção de chapa.
Secção de pintura	Área ocupada pela secção de pintura.

As movimentações a que uma viatura está sujeita ao longo do processo produtivo são:

1. Entrada na oficina para a secção de chapa (Desmontagem);
2. Da secção de chapa, para a secção de pintura (Preparação de Pintura e Pintura);
3. Da secção de pintura, para a secção de chapa (Montagem);
4. Da secção de chapa, para a secção de pintura (Acabamento);
5. Da secção de pintura, para o exterior da oficina (Lavagem);
6. Do exterior da oficina, para a rampa da oficina (Controlo);
7. Da rampa da oficina, para:
 - a. O exterior da oficina, caso não existam retrabalhos de pintura;

- b. A secção de pintura, caso existam retrabalhos de pintura.

Assim, estão descritas as movimentações a que uma viatura em reparação está sujeita ao longo do processo produtivo. No próximo subcapítulo, são descritas em maior detalhe as várias fases do processo.

3.3.3. Descrição do processo produtivo

O fluxograma da Figura 3.4 tem como objetivo ilustrar o processo produtivo em estudo. Seguidamente, é realizada uma breve explicação do mesmo.

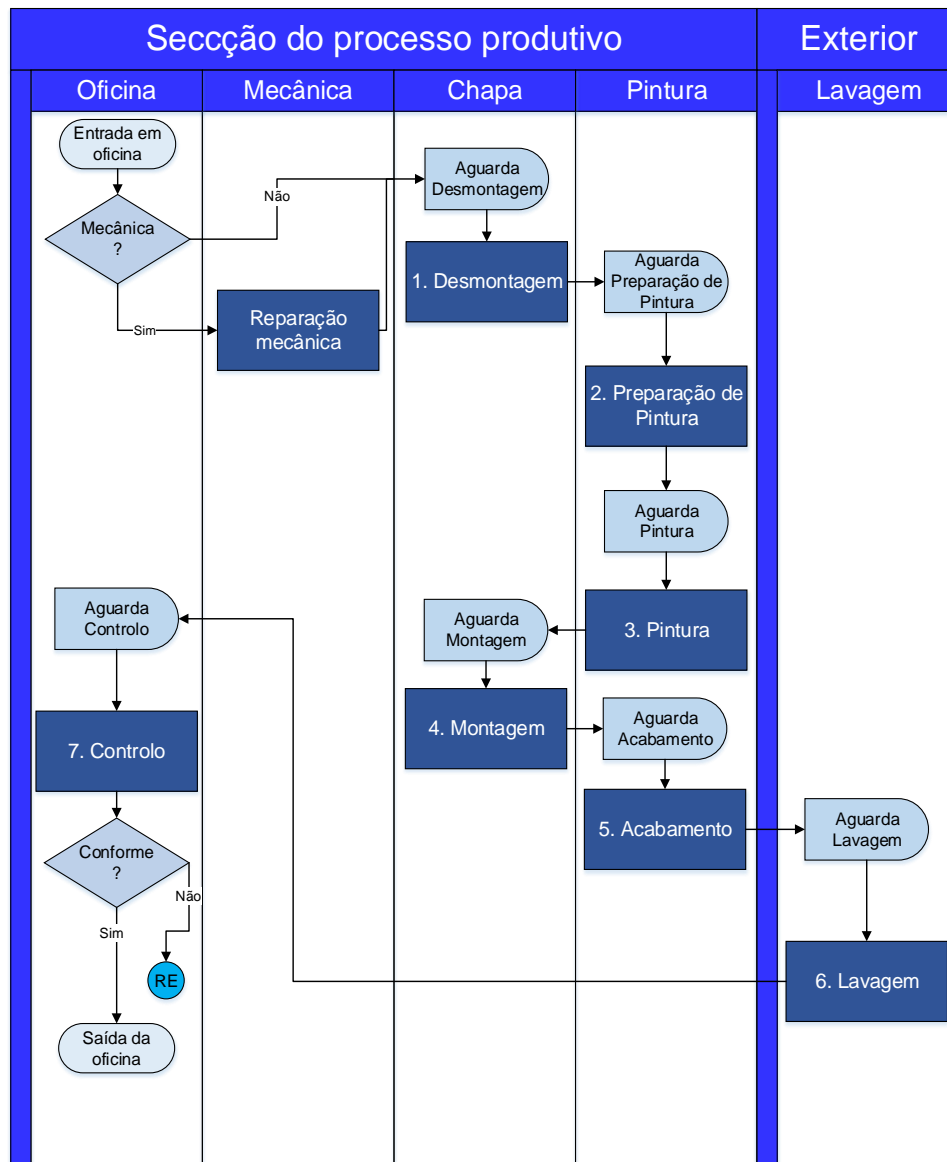


Figura 3.4 – Fluxograma do processo produtivo.

O processo produtivo inicia-se com a entrega da viatura na Receção no dia agendado e é encaminhada para a oficina pelo Rececionista. Para efeitos de estudo, considera-se que não são necessárias reparações de natureza mecânica pelo que, esta parte do processo é omitida na sua descrição. São agora brevemente explicitadas as várias fases do processo produtivo:

1. A viatura dá entrada na oficina e desloca-se para a secção de chapa onde aguarda disponibilidade de mão de obra da secção de chapa para dar início à fase de Desmontagem. Nesta fase, os componentes danificados são desacoplados da carroçaria da viatura e são reparados pelo técnico através de operações de restauro ou são encaminhados para a reciclagem para serem substituídos por novos. É feito um novo diagnóstico aos danos resultantes do sinistro para averiguar se é necessário encomendar mais componentes do que aqueles inicialmente orçamentados. Caso seja necessário encomendar mais componentes, os trabalhos na viatura devem continuar ao longo do processo até que o componente em falta impossibilite a conclusão de algum trabalho, ficando a viatura a aguardar a sua chegada. Concluída a fase de Desmontagem, a viatura e os respetivos componentes são encaminhados para a secção de pintura onde aguardam disponibilidade de mão de obra;
2. A segunda fase do processo ocorre na secção de pintura e denomina-se de Preparação de Pintura, na qual é feito o aperfeiçoamento das características físicas do material, para garantir a qualidade na aderência da tinta. Esta fase do processo é fundamental para um trabalho de pintura conforme porque, caso contrário, os defeitos existentes na chapa serão realçados na fase de Pintura, o que implica um retrabalho de pintura (RE), isto é, recomeçar todo o processo de pintura. A viatura é isolada com uma película apropriada que tem como função impedir a passagem de tinta para zonas indesejáveis. Os componentes danificados são pintados na íntegra, pelo que não é preciso isolá-los. Feito o isolamento, dá-se como concluída a fase de Preparação de Pintura e a viatura e os respetivos componentes aguardam entrada na estufa;
3. A viatura e/ou componentes dão entrada na estufa assim que uma estiver desocupada, dando-se início à fase de Pintura. O técnico procede com a pintura da viatura que consiste na aplicação de tinta e verniz nas partes danificadas. Após a aplicação, a viatura e os componentes permanecem na estufa a cozer para garantir a aderência da tinta nas superfícies aplicadas. Finalmente, a viatura e os componentes são retirados da estufa para secagem à temperatura ambiente. É de esperar que após esta fase, a viatura e os componentes estejam da mesma cor, garantindo um padrão homogéneo sem ser possível detetar diferentes *nuances*;
4. Concluída a fase de Pintura, a viatura e/ou respetivos componentes regressam à secção de chapa, onde aguardam disponibilidade de mão de obra para dar início à fase de Montagem. Nesta fase, o técnico procede com a montagem dos componentes desacoplados da carroçaria na primeira fase do processo. É feito um controlo de folgas e são feitas as afinações necessárias para repor as condições de origem na viatura;
5. A viatura já montada retorna à secção de pintura onde se dá a fase de Acabamento que consiste na correção de defeitos inerentes da Pintura, tais como, escorridos, fervidos ou pulverizações;
6. Após o Acabamento, a viatura abandona a oficina para o exterior onde será executada a fase de Lavagem cuja responsabilidade é da organização Wash & Go, subcontratada para o efeito;

7. Por fim, a viatura volta à oficina para controlo de qualidade dos trabalhos de pintura executados. A viatura aguarda pelo responsável pelo controlo de qualidade e se o trabalho for considerado conforme, a viatura abandona a oficina para ser entregue ao cliente. Caso contrário, é necessário um retrabalho de pintura, pelo que, a viatura necessita de passar novamente pelas fases de Preparação de Pintura, Pintura e Acabamento, onde serão corrigidas as inconformidades. Corrigidas as inconformidades, a viatura abandona a oficina, sem ser necessário passar novamente pelas fases de Lavagem e Controlo.

Assim, dá-se por concluída a descrição do processo produtivo da oficina da Caetano Colisão.

Importa referir que as fases de Desmontagem, Preparação de Pintura, Pintura, Montagem e Acabamento são de valor acrescentado, já que o cliente paga pelas horas previstas de chapa e pintura despendidas na reparação da sua viatura. No entanto, as fases de Lavagem e Controlo, apesar de necessárias, não são de valor acrescentado. Por fim, os retrabalhos de pintura não acrescentam valor para o cliente, pelo que, devem ser reduzidos, ou mesmo eliminados, do processo de reparação.

3.4. Síntese do capítulo

Em suma, no presente capítulo foi apresentado o Grupo Salvador Caetano, as respetivas *sub-holdings* e a oficina Caetano Colisão. São descritos os procedimentos necessários para a entrada de uma viatura para reparação como a Peritagem, Orçamentação e Planeamento. É feita uma caracterização da oficina em estudo, em particular, das instalações onde se encontra, da respetiva capacidade e das fases do processo de reparação automóvel. Por fim, são descritas as várias fases do processo, acompanhado do fluxograma do processo (Figura 3.4). Finalmente, estão reunidas as condições para o desenvolvimento do modelo de simulação que irá modelar o funcionamento atual da oficina com base num conjunto de pressupostos e simplificações assumidas.

4. Desenvolvimento do modelo de simulação

Neste capítulo, são descritas as várias etapas necessárias ao desenvolvimento do modelo de simulação no que diz respeito à estrutura e à quantificação das variáveis do *input*.

4.1. Modelação estrutural

É condição necessária a um estudo de simulação assumir-se um conjunto de pressupostos e simplificações sobre o funcionamento do sistema que permitam desenvolver um modelo pouco complexo mas válido para atingir os objetivos estabelecidos.

4.1.1. Pressupostos a considerar no modelo de simulação

São enumerados alguns pressupostos e simplificações assumidas quando da modelação do sistema em estudo, nomeadamente:

1. São consideradas reparações de natureza não mecânica;
2. O tempo de movimentação das viaturas entre os postos de trabalho é nulo;
3. Um técnico trabalha em apenas 1 viatura de cada vez;
4. As viaturas chegam diariamente à oficina, ao longo das oito horas de trabalho;
5. Os tempos associados a micropausas, pausas aleatórias e pausa para almoço são nulos (o tempo associado à pausa para almoço é considerado nulo porque os trabalhos interrompidos durante a pausa para almoço são retomados no mesmo estado e pelo mesmo técnico. Logo, para efeitos de modelação, considera-se que a oficina opera continuamente durante as 8 horas diárias);
6. O sistema funciona continuamente durante as 8 horas diárias e os trabalhos que são interrompidos no final de um dia de trabalho são retomados no dia seguinte, pelo que, o estudo de simulação é do tipo *steady-state*;
7. Os tempos despendidos na procura de material e ferramentas e na arrumação dos postos de trabalho são nulos;
8. É associada uma duração reduzida à fase de Controlo para representar o tempo de espera a que as viaturas estão sujeitas quando aguardam por este controlo de qualidade. O técnico responsável pela fase de Controlo tem outras funções, pelo que, não está sempre disponível para desempenhar esta fase do processo. No entanto, para efeitos de modelação, considera-se que o técnico desempenha apenas a fase de Controlo;
9. Todo o processo de pintura deve ser recomeçado se uma viatura estiver sujeita a retrabalhos de pintura, ou seja, um retrabalho de pintura implica voltar a passar nas fases de Preparação de Pintura, Pintura e Acabamento;

10. Quando uma viatura dá entrada no posto de trabalho a tarefa é realizada até ao fim (ou seja, é indivisível).

Assumidos os pressupostos e as simplificações necessárias ao desenvolvimento do modelo, procede-se à modelação estrutural que consiste na construção lógica das várias fases do processo. Para tal, é desenvolvido um modelo conceptual para auxiliar na definição da sequência das várias fases do processo e nos períodos de espera associados.

4.1.2. Desenvolvimento do modelo estrutural

O modelo conceptual do processo pode ser representado por um fluxograma, pelo que no presente caso de estudo corresponde ao fluxograma da Figura 3.4 (capítulo 3). Assim, procede-se à “tradução” do modelo conceptual para o modelo computacional no *software* ARENA. A Figura 4.1. ilustra o modelo computacional, sendo em seguida apresentada uma breve explicação.

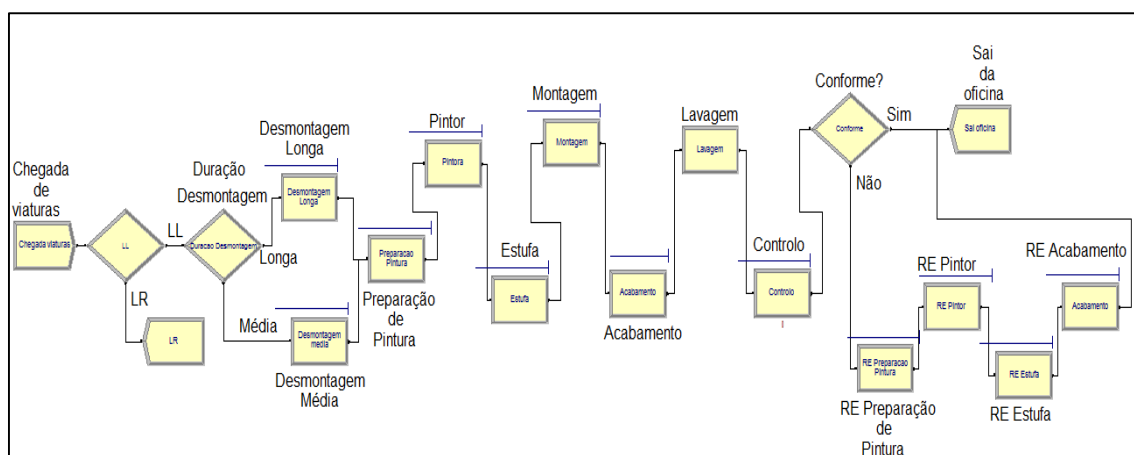


Figura 4.1- Modelo estrutural no *software* ARENA.

A chegada de entidades (ou seja, viaturas) ao modelo é modelada pelo módulo *Create* “Chegada viaturas” que modela o intervalo de tempo entre chegadas de viaturas à oficina. O módulo *Decide* denominado de “LL” (Linha Longa) encaminha a entidade para o percurso “LL” com uma probabilidade de 75%. Esta probabilidade representa a proporção de viaturas que quando entram na oficina são encaminhadas para a LL. Logo, 75% das entidades que são geradas são enviadas para as fases do processo em estudo, representadas pelos sucessivos módulos. As restantes 25% das entidades seguem o percurso “LR”, representando as viaturas que são encaminhadas para a Linha Rápida (LR). Uma vez que a LR não é objeto de estudo, as entidades seguem para um módulo *Dispose* também identificado por “LR” que se traduz na saída de entidades do modelo.

Em seguida, a entidade segue para outro módulo *Decide* “Duração Desmontagem” no qual é feita a distinção entre Desmontagem de duração média ou Desmontagem de duração longa. Com base nos dados recolhidos, verificou-se que 75% das viaturas eram sujeitas a desmontagens de duração média, ou seja, desmontagens cuja duração não excedia 6,6 horas. As restantes 25% das viaturas eram sujeitas a desmontagens de duração longa, ou seja, desmontagens cuja duração excedia 6,6 horas. Portanto, 75% das entidades que são geradas são enviadas para o módulo *process* “Desmontagem

media” que modela a fase de Desmontagem de duração média, enquanto que, as restantes 25% das entidades que são geradas são enviadas para o módulo *process* “Desmontagem Longa” que modela a fase de Desmontagem de duração longa.

Num módulo *process* é necessário especificar a sua ação lógica, a duração da atividade que representa e associar-lhe um ou mais recursos. Todos os módulos *process* do presente modelo (exceto o módulo “Lavagem”) são caracterizados pela ação lógica *seize-delay-release*, isto é, a entidade aguarda numa fila de espera enquanto o recurso estiver ocupado, ocupa (*seize*) o recurso durante um intervalo tempo (definido em *delay*), findo o qual liberta (*release*) o recurso para que outra entidade que esteja na fila de espera possa novamente ocupá-lo. Em particular, quando uma entidade entra num dos módulos *process* que modela a fase de Desmontagem, ocupa um técnico da equipa da secção de chapa durante um determinado intervalo de tempo. Quando a entidade segue para o módulo *process* “Preparacao Pintura”, o recurso fica disponível para ser ocupado por outra entidade.

A fase de Pintura é representada por dois módulos *process* em série de designações “Pintor” e “Estufa”, uma vez que a aplicação de tinta nas viaturas pelo técnico e o seu cozimento nas estufas ocorre de modo sequencial. Logo, faz sentido em termos lógicos a representação desta fase por dois módulos *process* em que o módulo “Pintor” representa a aplicação de tinta e verniz nas viaturas pelo técnico pintor e o outro módulo “Estufa” que representa o cozimento das viaturas numa das estufas. Ambos os módulos *process* têm a ação lógica *seize-delay-release*.

A explicação dos sucessivos módulos com designação idêntica às fases do processo é análoga à descrita nos módulos anteriores, exceto no módulo “Lavagem”. Este módulo tem a ação lógica *delay*. A entidade está sujeita a uma atividade que consome tempo mas não ocupa qualquer recurso da oficina porque é desempenhada por uma organização subcontratada pela oficina.

Por fim, a entidade abandona o módulo *process* “Lavagem”, entrando no módulo *process* “Controlo” que representa a última fase do processo. Com base no período de recolha, estimou-se que 10% das viaturas estiveram sujeitas a retrabalhos de pintura. Assim, o módulo *Decide* “Conforme” representa a tomada de decisão pelo técnico responsável pela fase de Controlo em relação à conformidade dos trabalhos de pintura. Logo, a probabilidade de as entidades serem encaminhadas para o percurso “Sim” é de 90%, o que significa que a entidade segue para o modelo *Dispose* “Sai oficina”, ou seja, abandona o modelo, traduzindo-se na saída da viatura da oficina. De forma complementar, as restantes 10% das entidades são encaminhadas para o curso “Não”, o que implica que a entidade terá de passar pelos módulos *process* “RE Preparacao Pintura”, “RE Pintor”, “RE Estufa” e “RE Acabamento”, o que significa que a viatura está sujeita a retrabalhos de pintura (RE). Finalizados os retrabalhos de pintura, a entidade segue para o módulo *Dispose* “Sai oficina” abandonando o modelo.

4.1.3. Entidades e recursos

Concluída a modelação estrutural do sistema, deve caracterizar-se as entidades que o percorrem. Neste modelo, existe apenas um tipo de entidades que são as viaturas. No *Data Module Entity* é definida a entidade e uma imagem, tal como é ilustrado na Figura 4.2.

Entity - Basic Process		
	Entity Type	Initial Picture
1	Viatura	Picture.Van

Figura 4.2 – Definição da entidade.

As entidades têm a designação de “Viatura” cuja imagem é um automóvel (*Picture.Van*). Através da animação do modelo, é possível observar a entidade a percorrer as várias fases do processo, possibilitando verificar se todos os pressupostos e relações lógicas estão a ser cumpridos.

Após a caracterização das entidades no modelo de simulação, deve definir-se os recursos utilizados nos vários módulos *process*. Para os módulos “Desmontagem media”, “Desmontagem Longa” “Preparacao Pintura”, “Estufa” e “Montagem” foram definidos três *Sets* (conjuntos) para representar a equipa dos técnicos da secção de chapa responsável pelas fases de Desmontagem e Montagem, a equipa de técnicos responsável pela fase de Preparação de Pintura e as estufas necessárias na fase de Pintura.

Um *Set* é caracterizado por uma designação (*Name*), um tipo (*Type*) e o número de membros que pertencem ao *Set* (*Members*). A Figura 4.3 ilustra os três *Sets* definidos no *software*.

Set - Basic Process			
	Name	Type	Members
1	Chapa	Resource	9 rows
2	PP	Resource	6 rows
3	Estufas	Resource	3 rows

Figura 4.3 – *Sets* de recursos.

Conforme é possível constatar na Figura 4.3, o *Set* “Chapa” corresponde à equipa de 9 técnicos (9 recursos de capacidade 1) da secção de chapa que são responsáveis pelas fases de Desmontagem e Montagem. O *Set* de designação “PP” corresponde aos 6 técnicos (6 recursos de capacidade 1) responsáveis pela fase de Preparação de Pintura e o *Set* “Estufas” corresponde às 3 estufas (3 recursos de capacidade 1) disponíveis na fase de Pintura. Os *Sets* “PP” e “Estufas” estão também associados aos módulos *process* “RE Preparacao Pintura” e “RE Estufa”, respetivamente.

As fases de Desmontagem e Montagem partilham os mesmos técnicos, pelo que, os módulos *process* “Desmontagem media”, “Desmontagem Longa” e “Montagem” estão associados ao mesmo *Set* de recursos, o *Set* “Chapa”.

Em relação aos módulos “Pintor”, “Acabamento” e “Controlo” é necessário associar-lhes apenas um recurso de capacidade 1, já que essas fases do processo são executadas apenas por 1 técnico. Assim, no *Data Module Resource* devem ser definidos os recursos de capacidade 1 cuja identificação é “Tecnico Pintor”, “Tecnico Acabamento” e “Tecnico Controlo”, para cada um dos módulos respetivamente. Os módulos *process* “RE Pintor” e “RE Acabamento” estão, também, associados aos recursos “Tecnico Pintor” e “Tecnico Acabamento”, respetivamente.

Os recursos podem ser são do tipo *Fixed Capacity* ou *Based on Schedule*. Um recurso do tipo *Fixed Capacity* é um recurso cuja capacidade não varia ao longo da simulação. Um recurso do tipo *Based on Schedule* é um recurso cuja capacidade pode variar de acordo com um horário definido ao longo da simulação. Para o presente caso de estudo todos os recursos são do tipo *Fixed Capacity*, pois considera-se que a oficina opera continuamente ao longo das 8 horas diárias e que a capacidade de cada recurso se mantém inalterada ao longo da simulação.

Existem 21 recursos (técnicos) com capacidade fixa de 1 unidade (Figura 4.4). Os técnicos da equipa de secção de chapa estão numerados de 1 a 9, enquanto os técnicos da equipa responsável pela fase de Preparação de Pintura estão designados de A a F. Cada estufa tem capacidade para albergar somente uma viatura.

Resource - Basic Process			
	Name	Type	Capacity
1	Tecnico Acabamento	Fixed Capacity	1
2	Tecnico Controlo	Fixed Capacity	1
3	Tecnico 1	Fixed Capacity	1
4	Tecnico 2	Fixed Capacity	1
5	Tecnico 3	Fixed Capacity	1
6	Tecnico 4	Fixed Capacity	1
7	Tecnico 5	Fixed Capacity	1
8	Tecnico 6	Fixed Capacity	1
9	Tecnico 7	Fixed Capacity	1
10	Tecnico 8	Fixed Capacity	1
11	Tecnico 9	Fixed Capacity	1
12	Tecnico A	Fixed Capacity	1
13	Tecnico B	Fixed Capacity	1
14	Tecnico C	Fixed Capacity	1
15	Tecnico D	Fixed Capacity	1
16	Tecnico E	Fixed Capacity	1
17	Tecnico F	Fixed Capacity	1
18	Estufa 1	Fixed Capacity	1
19	Estufa 2	Fixed Capacity	1
20	Estufa 3	Fixed Capacity	1
21	Tecnico Pintor	Fixed Capacity	1

Figura 4.4 – Recursos do modelo de simulação.

Assim, depois de estruturado o modelo de simulação, definida a entidade e caracterizados os recursos associados aos módulos *process* que representam as várias fases do processo, procede-se à verificação do modelo. Assim, foram definidos *inputs* determinísticos com o objetivo de verificar o modelo de simulação pela observação das entidades a percorrer as várias fases do processo de acordo com a lógica definida. Graças à animação do *software* ARENA, é possível verificar que as entidades seguem a lógica definida pelo modelo, pelo que se considera que o modelo foi contruído corretamente.

Finalmente, devem ser analisados estatisticamente os tempos de processamento das várias fases do processo de modo a permitir representar as várias fontes de aleatoriedade no modelo, já no âmbito da modelação quantitativa.

4.2. Modelação quantitativa

Após a modelação estrutural, deve ser feito o tratamento estatístico dos dados recolhidos que, no presente caso de estudo, correspondem aos tempos de processamento de algumas fases do processo, nomeadamente, as fases de Desmontagem, Preparação de Pintura, Pintura e Montagem. Para a sua determinação, registaram-se as horas de entrada e de saída das viaturas nos postos de trabalho das várias fases do processo e, pela sua diferença, é calculado o tempo decorrido. As fases Acabamento, Lavagem e Controlo foram modeladas de acordo com estimativas fornecidas pelos técnicos e com base no período de recolha. A análise dos tempos de processamento recolhidos foi feita recorrendo à aplicação do *software* ARENA, o *Input Analyzer*. Como critérios de não rejeição do ajustamento, exige-se que o *p-value* correspondente dos testes do Qui Quadrado (QQ) e do *Kolmogorov-Smirnov* (K-S) seja superior ao nível de significância considerado ($\alpha = 0,05 = 5\%$). Assim, identifica-se como valores de decisão os *p-value* correspondentes dos testes de ajustamento e o valor do erro quadrático médio associado.

4.2.1. Processo de chegadas

Para modelar o intervalo de tempo entre chegadas de viaturas à oficina, foi solicitado o registo do número de entradas de viaturas por dia ao longo de 10 meses, resultando num total de 222 observações. O histograma das frequências relativas do número de entradas diárias de viaturas encontra-se no Anexo B.1.

A Figura 4.5 representa o ajustamento da curva de distribuição de probabilidade sugerido pelo *Input Analyzer* ao histograma do número de entradas diárias de viaturas. Note-se que deve ser escolhida uma distribuição de probabilidade discreta dado que a variável número de viaturas que entram em oficina por dia de trabalho assume apenas valores inteiros, pelo que, foi seleccionada a distribuição de *Poisson*, ou seja, pretende-se testar a hipótese:

H_0 : O número de entradas diárias de viaturas na oficina segue uma distribuição de *Poisson*

H_1 : O número de entradas diárias de viaturas na oficina não segue uma distribuição de *Poisson*

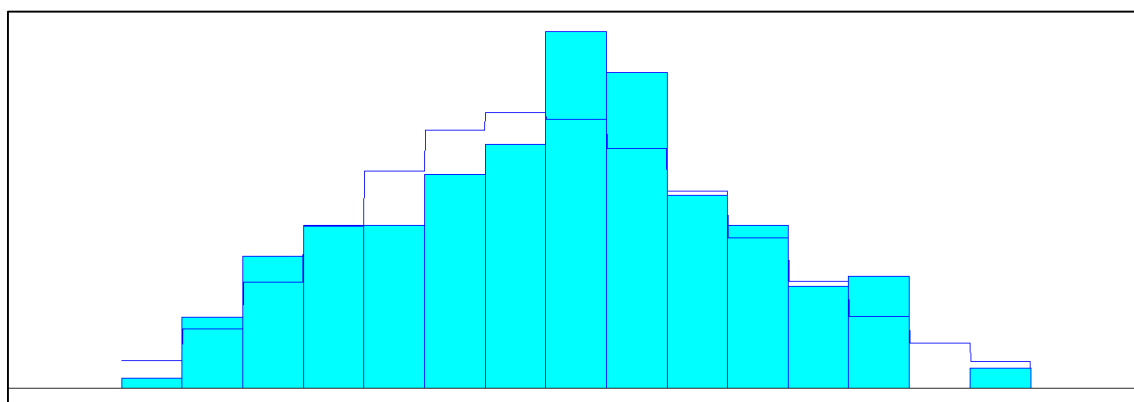


Figura 4.5 – Ajustamento do número diários de entradas de viaturas à distribuição de *Poisson*.

Conforme é possível observar pela Figura 4.5, verifica-se um ajustamento adequado da distribuição de *Poisson* ao histograma do número de entradas diárias de viaturas.

A Tabela 4.1 resume o número de observações recolhidas para modelar o intervalo de tempo entre chegadas de viaturas à oficina, a distribuição de probabilidade *Poisson* e o respetivo parâmetro sugerido pelo *Input Analyzer*, o erro quadrático associado ao ajustamento e o *p-value* correspondente do teste do QQ (relembre-se que o teste do K-S se destina apenas a testar hipóteses de ajustamentos de dados a distribuições contínuas).

Tabela 4.1 – Informações relativas à modelação do intervalo de tempo entre chegadas de viaturas ao modelo.

Número de observações	222
Distribuição de probabilidade	$P \sim (10,7)$ (viaturas)
Erro quadrático do ajustamento	0,0049
<i>p-value</i> (QQ)	0,548

Uma vez que o *p-value* correspondente à estatística de teste do QQ é igual a 0,548, por isso superior ao nível de significância estabelecido ($\alpha = 5\%$), então não há evidências estatísticas de que o processo de chegadas diárias de viaturas à oficina não possa ser modelado por uma distribuição de *Poisson* de valor médio 10,7 viaturas. Este ajustamento tem com um erro quadrático associado de 0,0049.

Assumindo que as chegadas diárias de viaturas à oficina é um processo de *Poisson* estacionário, de acordo com o Teorema apresentado no Anexo A.6., pode definir-se que o intervalo de tempo que decorre entre as chegadas consecutivas de duas viaturas à oficina segue uma distribuição exponencial de parâmetro 0,093 dias $\left(= \frac{1}{10,7}\right)$.

A Figura 4.6 ilustra o módulo *Create* “Chegada viaturas” no qual é identificada a distribuição de probabilidade que modela o intervalo de tempo entre chegadas consecutivas de entidades ao sistema, para além de serem definidos o número e tipo de entidades que entram de cada vez, o número máximo de entidades que pode entrar por dia e o instante em que chega a primeira entidade.

The screenshot shows a 'Create' dialog box with the following fields and values:

- Name:** Chegada viaturas (dropdown menu)
- Entity Type:** Viatura (dropdown menu)
- Time Between Arrivals:**
 - Type:** Random (Expo) (dropdown menu)
 - Value:** 0.093 (text input)
 - Units:** Days (dropdown menu)
- Entities per Arrival:** 1 (text input)
- Max Arrivals:** infinite (text input)
- First Creation:** 0.0 (text input)

Figura 4.6 – Módulo *Create*.

Assim, o módulo *Create* “Chegada viaturas” modela o intervalo de tempo entre chegadas de viaturas à oficina através da distribuição exponencial com o parâmetro 0,093 dias (EXPO (0,093)). Entra uma viatura de cada vez na oficina e não existem restrições ao número de entradas, pelo que é definido o valor 1 para o campo *Entities per Arrival* e *Infinite* para o campo *Max Arrivals*. Por fim, define-se que a chegada da primeira entidade ao sistema se dá no início do dia de trabalho (0,0 unidades de tempo no relógio de simulação).

Por fim, procede-se à modelação das fases do processo.

4.2.2. Fase de Desmontagem de duração média

No que à fase de Desmontagem de duração média diz respeito, foram observados tempos de processamento inferiores a 6,6 horas de 104 viaturas. O diagrama de dispersão dos tempos de processamento da fase de Desmontagem de duração média é ilustrado pela Figura 4.7.

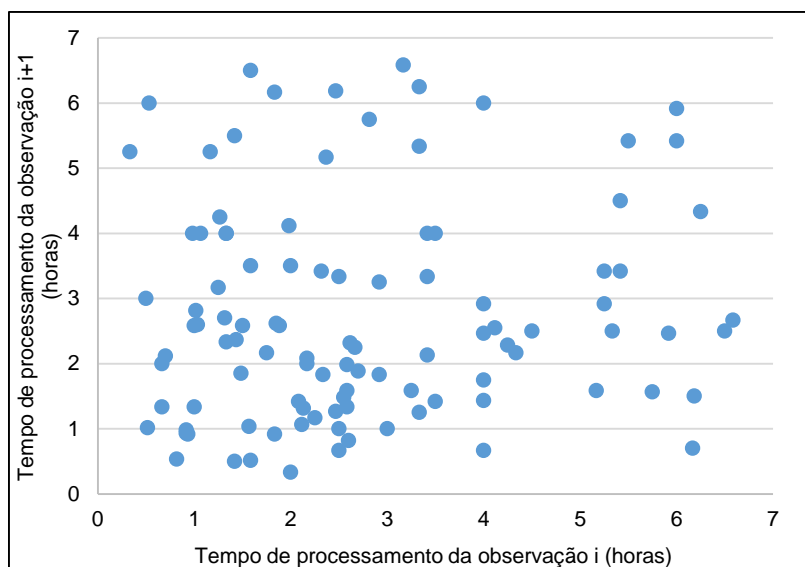


Figura 4.7 – Diagrama de dispersão da fase de Desmontagem de duração média.

Através da observação da Figura 4.7, não é possível detetar qualquer padrão que permita aferir que existe alguma correlação entre os tempos de processamento da fase de Desmontagem de duração média, pelo que se conclui que existe independência entre as observações.

Considerando a independência dos dados, é construído o histograma dos tempos de processamento da Desmontagem de duração média (Figura 4.8). Importa referir que para a construção do histograma, utilizou-se a raiz quadrada do número de observações, aproximado por defeito, para a determinação do número de classes e foram consideradas as frequências relativas em percentagem das observações (eixo vertical). Informações relativas à construção do histograma podem ser encontradas no Anexo B.2.

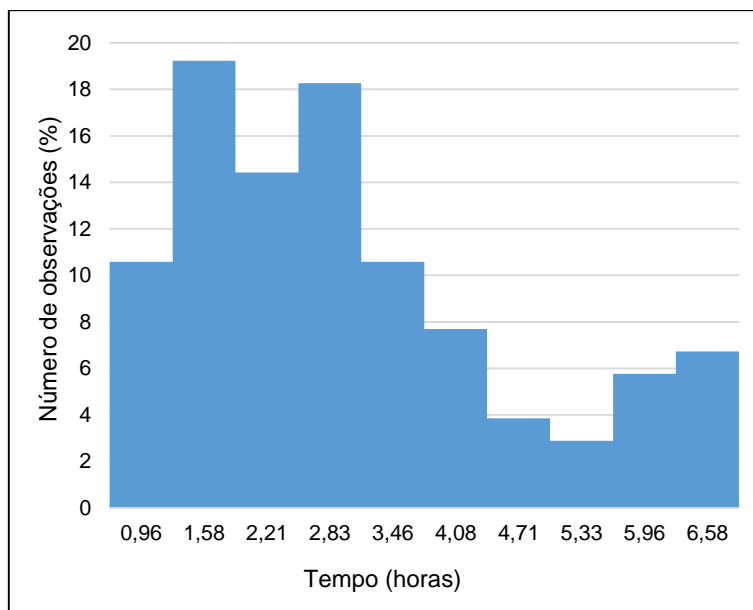


Figura 4.8 – Histograma dos tempos de processamento da fase de Desmontagem de duração média.

Através da opção *Fit All* da aplicação *Input Analyzer* é sugerida a distribuição de probabilidade Gamma pois é a que apresenta o menor erro quadrático associado. No Anexo B.2. encontra-se o sumário (*Summary*) dos erros quadráticos dos ajustamentos entre várias distribuições de probabilidade e o conjunto dos tempos de processamento da fase de Desmontagem de duração média.

A curva da distribuição de probabilidade Gamma e o histograma dos tempos de processamento da fase de Desmontagem de duração média são apresentados na Figura 4.9.

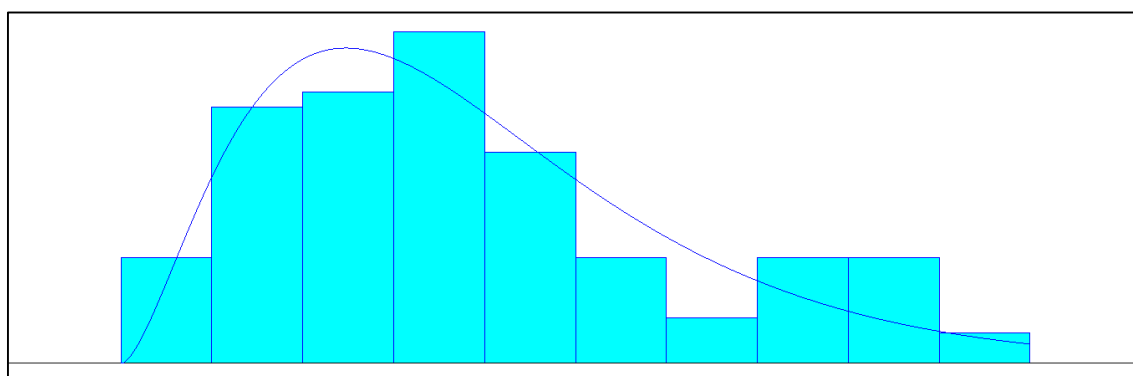


Figura 4.9 – Ajustamento dos tempos de processamento da fase de Desmontagem de duração média à distribuição Gamma.

A Figura 4.9 sugere o ajustamento da curva da distribuição de probabilidade Gamma ao histograma dos dados, já que não são evidenciadas grandes discrepâncias entre eles.

A Tabela 4.2 contém o número de observações da fase de Desmontagem de duração média, a distribuição de probabilidade Gamma e os respetivos parâmetros sugeridos pelo *Input Analyzer*, o valor do erro quadrático do ajustamento e os *p-value* correspondentes às estatísticas dos testes do QQ e do K-S.

Tabela 4.2 – Informações relativas à modelação do tempo de processamento da fase de Desmontagem de duração média.

Número de observações	104
Distribuição de probabilidade	Gamma~(1,02; 2,7)
Erro quadrático do ajustamento	0,0066
<i>p-value</i> (QQ)	0,419
<i>p-value</i> (K-S)	>0,15

Verifica-se que os *p-value* das estatísticas dos testes do QQ e do K-S são superiores a 5% o que implica a não rejeição da hipótese de os tempos de processamento da fase de Desmontagem de duração média serem modelados por uma distribuição de probabilidade Gamma de parâmetros 1,02 e 2,7 horas, correspondendo a um erro quadrático médio de 0,0066.

A Figura 4.10 ilustra o preenchimento dos parâmetros relativos ao módulo *process* “Desmontagem media” que modela a fase de Desmontagem de duração média.

The screenshot shows the 'Process' configuration window. It includes fields for Name, Type, Logic, Action, Priority, Resources, Delay Type, Units, Allocation, Expression, and a Report Statistics checkbox. The configuration is for a process named 'Desmontagem media' using a 'Standard' type, with a 'Seize Delay Release' action and 'Medium(2)' priority. The resource is 'Set, Chapa, 1, Random,' and the delay is modeled by a Gamma distribution 'GAMM(1.02 , 2.7)' in 'Hours' units, with 'Value Added' allocation. Statistics reporting is enabled.

Figura 4.10 – Módulo *process* “Desmontagem media”.

Conforme é possível observar pela Figura 4.10, ao módulo *process* “Desmontagem media” está associado o *Set* de recursos “Chapa” que corresponde à equipa da secção de chapa e é definida a ação lógica *seize-delay-release* cujo *delay* é de valor acrescentado (*Value Added*) e é modelado através de distribuição de uma probabilidade Gamma de parâmetros 1,02 e 2,7 horas. A instrução *Random* significa que a atribuição de tarefas aos técnicos da equipa da secção de chapa é aleatória, ou seja, qualquer técnico da equipa de secção de chapa pode iniciar uma desmontagem numa viatura desde que esteja desocupado.

A metodologia utilizada na modelação dos tempos de processamento da fase de Desmontagem de duração média é idêntica para as fases Desmontagem de duração longa, Preparação de Pintura, Pintura, Montagem e Acabamento. Como tal, sugere-se a consulta dos Anexos B.2. a B.6., relativos a tratamento estatístico dos tempos de processamento das fases do processo supramencionadas.

4.2.3. Fase de Desmontagem de duração longa

A informação relativa à modelação dos tempos de processamento da fase de Desmontagem de duração longa encontra-se no Anexo B.3.

A Figura 4.11 ilustra o preenchimento dos parâmetros relativos ao módulo *process* “Desmontagem Longa” que modela a fase de Desmontagem de duração longa.

The screenshot shows a 'Process' dialog box with the following fields and values:

- Name:** Desmontagem Longa
- Type:** Standard
- Logic:**
 - Action:** Seize Delay Release
 - Priority:** Medium(2)
- Resources:**
 - Set, Chapa, 1, Random, <End of list>
 - Buttons: Add..., Edit..., Delete
- Delay Type:** Expression
- Units:** Hours
- Allocation:** Value Added
- Expression:** 6+EXPO(10.1)
- ☒ Report Statistics

Figura 4.11 – Módulo *process* “Desmontagem Longa”.

Conforme é possível observar pela Figura 4.11, ao módulo *process* “Desmontagem Longa” está associado o Set de recursos “Chapa” que corresponde à equipa da secção de chapa e é definida a ação lógica *seize-delay-release* cujo *delay* é de valor acrescentado (*Value Added*) e é modelado através de uma distribuição de probabilidade Exponencial de expressão 6+EXPO (10,1) horas. A instrução *Random* significa que a atribuição de tarefas aos técnicos da equipa da secção de chapa é aleatória, ou seja, qualquer técnico da equipa de secção de chapa pode iniciar uma desmontagem numa viatura desde que esteja desocupado.

4.2.4. Fase de Preparação de Pintura

A informação relativa à modelação dos tempos de processamento da fase de Preparação de Pintura encontra-se no Anexo B.4.

A Figura 4.12 ilustra o preenchimento dos parâmetros relativos ao módulo *process* “Preparacao Pintura” que modela a fase de Preparação de Pintura.

The screenshot shows the 'Process' configuration window. It includes fields for Name, Type, Logic (Action and Priority), Resources (a list with 'Set, PP, 1, Random,' and '<End of list>'), Delay Type, Units, Allocation, Expression, and a 'Report Statistics' checkbox.

Figura 4.12 – Módulo process “Preparacao Pintura”.

Conforme é possível observar pela Figura 4.12, ao módulo *process* “Preparacao Pintura” está associado o *Set* de recursos “PP” que corresponde à equipa de 6 técnicos responsáveis pela fase de Preparação de Pintura, sendo definida a ação lógica *seize-delay-release* e cujo *delay* é de valor acrescentado (*Value Added*) e é modelado através de uma distribuição de probabilidade Weibull de parâmetros 5,15 e 1,47 horas. A instrução *Random* significa que a atribuição de tarefas aos técnicos responsáveis pela fase de Preparação de Pintura é aleatória, ou seja, qualquer técnico responsável pela fase de Preparação de Pintura pode iniciar a atividade desde que esteja desocupado.

O módulo *process* “RE Preparacao Pintura” modela a fase de Preparação de Pintura quando existe um retrabalho de pintura. A Figura 4.13 ilustra o preenchimento dos parâmetros necessários à modelação.

The screenshot shows a 'Process' dialog box with the following fields and settings:

- Name:** RE Preparacao Pintura
- Type:** Standard
- Logic:**
 - Action:** Seize Delay Release
 - Priority:** High(1)
- Resources:**
 - Set, PP, 1, Random,
 - <End of list>
 - Buttons: Add..., Edit..., Delete
- Delay Type:** Expression
- Units:** Hours
- Allocation:** Non-Value Added
- Expression:** WEIB(5.15, 1.47)
- ☒ Report Statistics

Figura 4.13 – Módulo process “RE Preparacao Pintura”.

O módulo *process* “RE Preparacao Pintura” é em todo idêntico ao módulo *process* “Preparacao Pintura” à exceção dos campos *Priority* e *Allocation*. Uma vez que este módulo modela os retrabalhos de pintura que são realizados pela mesma equipa de técnicos responsáveis pela fase de Preparação de Pintura, é dada às viaturas que estão nestas circunstâncias uma prioridade *High (1)* na ocupação dos recursos face àquelas que entram no módulo *process* “Preparacao Pintura” cuja prioridade é *Medium (2)*. Assim, caso só haja um recurso disponível, uma viatura que solicita um trabalho da fase de Preparação de Pintura e uma viatura que solicita um retrabalho da fase de Preparação de Pintura, o recurso é atribuído à viatura que solicita o retrabalho da fase de Preparação de Pintura. Como o módulo *process* “RE Preparacao Pintura” representa um retrabalho de pintura que não acrescenta valor para o cliente, no campo *Allocation* é selecionada a opção *Non-Value Added*. A instrução *Random* também significa que a atribuição de tarefas aos técnicos responsáveis pela fase de Preparação de Pintura é aleatória, ou seja, qualquer técnico responsável pela fase de Preparação de Pintura pode iniciar a atividade de retrabalho desde que esteja desocupado.

4.2.5. Fase de Pintura

A Figura 4.14 ilustra o preenchimento dos parâmetros relativos ao módulo *process* “Pintor” que modela a aplicação da tinta e do verniz nas viaturas por parte do técnico pintor na fase de Pintura.

The image shows a software window titled "Process" with a standard Windows-style title bar (minimize, maximize, close buttons). The window is divided into several sections:

- Name:** A dropdown menu showing "Pintor".
- Type:** A dropdown menu showing "Standard".
- Logic:** A section containing:
 - Action:** A dropdown menu showing "Seize Delay Release".
 - Priority:** A dropdown menu showing "Medium(2)".
- Resources:** A list box containing "Resource, Tecnico Pintor, 1" and "<End of list>". To the right of the list box are three buttons: "Add...", "Edit...", and "Delete".
- Delay Type:** A dropdown menu showing "Uniform".
- Units:** A dropdown menu showing "Hours".
- Allocation:** A dropdown menu showing "Value Added".
- Minimum:** A text input field containing "0.16".
- Maximum:** A text input field containing "0.33".
- Report Statistics:** A checkbox that is checked.

Figura 4.14 – Módulo process “Pintor”.

Conforme é possível observar pela Figura 4.14, ao módulo *process* “Pintor” está associado o recurso “Tecnico Pintor” que corresponde ao técnico pintor responsável pela aplicação da tinta e do verniz nas viaturas e é definida a ação lógica *seize-delay-release* cujo *delay* é de valor acrescentado (*Value Added*) e é modelado através de uma distribuição de probabilidade Uniforme de parâmetros 0,16 e 0,33 horas como estimativas dos valores mínimo e máximo, respetivamente.

A Figura 4.15 ilustra o preenchimento dos parâmetros relativos ao módulo *process* “RE Pintor” que modela o retrabalho da aplicação da tinta e do verniz nas viaturas por parte do técnico pintor na fase de Pintura.

O módulo *process* “RE Pintor” é em todo idêntico ao módulo *process* “Pintor” à exceção dos campos *Priority* e *Allocation*. Uma vez que este módulo modela os retrabalhos de pintura que são realizados pelo mesmo técnico pintor responsável pela aplicação da tinta e do verniz nas viaturas, é dada às viaturas que estão nestas circunstâncias uma prioridade *High (1)* na ocupação do recurso face àquelas que entram no módulo *process* “Pintor” cuja prioridade é *Medium (2)*. Assim, caso o recurso esteja disponível, uma viatura que solicita um trabalho na fase de Pintura e uma viatura que solicita um retrabalho na fase de Pintura, o recurso é atribuído à viatura que solicita o retrabalho na fase de Pintura. Como o módulo *process* “RE Pintor” representa um retrabalho de pintura que não acrescenta valor para o cliente, no campo *Allocation* é selecionada a opção *Non-Value Added*.

The 'Process' dialog box for 'RE Pintor' is shown. It has a title bar with a question mark and a close button. The 'Name' field is 'RE Pintor' and the 'Type' is 'Standard'. Under the 'Logic' section, the 'Action' is 'Seize Delay Release' and the 'Priority' is 'High(1)'. The 'Resources' list contains 'Resource, Tecnico Pintor, 1' and '<End of list>'. To the right of the resources list are buttons for 'Add...', 'Edit...', and 'Delete'. At the bottom, there are fields for 'Delay Type' (Uniform), 'Units' (Hours), and 'Allocation' (Non-Value Added). Below these are 'Minimum' (0.16) and 'Maximum' (0.33) fields. A checkbox for 'Report Statistics' is checked.

Figura 4.15 – Módulo *process* “RE Pintor”.

A informação relativa à modelação dos tempos de permanência nas estufas da fase de Pintura encontra-se no Anexo B.4.

A Figura 4.16 ilustra o preenchimento dos parâmetros relativos ao módulo *process* “Estufa” que modela o cozimento da tinta e do verniz das viaturas nas estufas na fase de Pintura.

The 'Process' dialog box for 'Estufa' is shown. It has a title bar with a question mark and a close button. The 'Name' field is 'Estufa' and the 'Type' is 'Standard'. Under the 'Logic' section, the 'Action' is 'Seize Delay Release' and the 'Priority' is 'Medium(2)'. The 'Resources' list contains 'Set, Estufas, 1, Random,' and '<End of list>'. To the right of the resources list are buttons for 'Add...', 'Edit...', and 'Delete'. At the bottom, there are fields for 'Delay Type' (Expression), 'Units' (Hours), and 'Allocation' (Value Added). Below these is an 'Expression' field containing 'ERLA(0.467, 6)'. A checkbox for 'Report Statistics' is checked.

Figura 4.16 – Módulo *process* “Estufa”.

Conforme é possível observar pela Figura 4.16, ao módulo *process* “Estufas” está associado o *Set* de recursos “Estufas” que corresponde às 3 estufas disponíveis na fase de Pintura, sendo definida a ação

lógica *seize-delay-release* cujo *delay* é de valor acrescentado (*Value Added*) e é modelado através de uma distribuição de probabilidade Erlang de parâmetros 0,467 e 6 horas. A instrução *Random* significa que a entrada de viaturas numa das 3 estufas é aleatória, ou seja, uma viatura pode entrar em qualquer estufa desde que uma das estufas esteja desocupada.

A Figura 4.17 ilustra o preenchimento dos parâmetros relativos ao módulo *process* “RE Estufas” que modela o retrabalho de cozimento da tinta e do verniz das viaturas nas estufas na fase de Pintura.

The screenshot shows a 'Process' dialog box with the following fields and values:

- Name:** RE Estufa
- Type:** Standard
- Logic:**
 - Action:** Seize Delay Release
 - Priority:** High(1)
 - Resources:** Set, Estufas, 1, Random, <End of list>
- Delay Type:** Expression
- Units:** Hours
- Allocation:** Non-Value Added
- Expression:** ERLA(0.467, 6)
- Report Statistics:** ☒

Figura 4.17 – Módulo process “RE Estufa”.

O módulo *process* “RE Estufas” é em todo idêntico ao módulo *process* “Estufas” à exceção dos campos *Priority* e *Allocation*. Uma vez que este módulo modela os retrabalhos de cozimento da tinta e do verniz nas viaturas, realizado por uma das 3 estufas disponíveis na fase de Pintura, é dada às viaturas que estão nestas circunstâncias uma prioridade *High (1)* na ocupação do recurso face àquelas que entram no módulo *process* “Estufas” cuja prioridade é *Medium (2)*. Assim, caso apenas uma estufa esteja disponível, uma viatura que solicita um trabalho de cozimento e uma viatura que solicita um retrabalho de cozimento, o recurso é atribuído à viatura que solicita o retrabalho de cozimento. Como o módulo *process* “RE Estufas” representa um retrabalho de pintura que não acrescenta valor para o cliente, no campo *Allocation* é selecionada a opção *Non-Value Added*.

4.2.6. Fase de Montagem

A informação relativa à modelação dos tempos de processamento da fase de Montagem encontra-se no Anexo B.6.

No que toca aos tempos de processamento da fase de Montagem, não há qualquer distribuição de probabilidade teórica que se adeque ao conjunto dos dados, pois não existe algum ajustamento de uma distribuição de probabilidade teórica ao conjunto dos tempos de processamento da fase de Montagem

que implique um *p-value* da estatística do teste do QQ superior ao nível de significância 5%. Assim, tal como para os tempos de processamento da fase de Desmontagem, dividiu-se o conjunto dos tempos recolhidos em 2 subconjuntos como forma de detetar se estes poderiam provir de populações diferentes. Todavia, ao dividir o conjunto dos tempos de processamento da fase de Montagem, verificou-se que nenhuma delas se ajustava a uma distribuição de probabilidade teórica, pelo que, se optou por uma distribuição de probabilidade empírica para a modelação desta fase do processo.

A Figura 4.18 ilustra o preenchimento dos parâmetros relativos ao módulo *process* “Montagem” que modela a fase de Montagem.

The image shows a 'Process' configuration window. It has several sections: 'Name' (Montagem), 'Type' (Standard), 'Logic' (Action: Seize Delay Release, Priority: Medium(2)), 'Resources' (a list with 'Set, Chapa, 1, Random,' and '<End of list>'), 'Delay Type' (Expression), 'Units' (Hours), 'Allocation' (Value Added), 'Expression' (a CONT function with 10 values), and a checked 'Report Statistics' checkbox.

Figura 4.18 – Módulo process “Montagem”.

Conforme é possível observar pela Figura 4.18, ao módulo *process* “Montagem” está associado o *Set* de recursos “Chapa” que corresponde à equipa de técnicos da secção de chapa e é definida a ação lógica *seize-delay-release* cujo *delay* é de valor acrescentado (*Value Added*) e é modelado através de uma distribuição de probabilidade empírica (a instrução *CONT* significa que a distribuição empírica gera valores contínuos). A instrução *Random* significa que a atribuição de tarefas aos técnicos da equipa da secção de chapa é aleatória, ou seja, qualquer técnico da equipa de secção de chapa pode iniciar a montagem dos componentes na viatura desde que esteja desocupado.

4.2.7. Acabamento

A fase de Acabamento foi modelada através de estimativas obtidas pela opinião de pessoas conhecedoras do processo. Assim, foram solicitados valores mínimo, médio e máximo de modo a que esta fase do processo fosse modelada por uma distribuição de probabilidade Triangular. As estimativas sugeridas foram 0,16 horas para o valor mínimo (10 minutos), 0,5 horas para o valor médio (30 minutos)

e 0,75 horas para o valor máximo (45 minutos). A Figura 4.19 ilustra o preenchimento dos parâmetros relativos ao módulo *process* “Acabamento” que modela a fase de Acabamento.

Process		
Name:	Acabamento	
Type:	Standard	
Logic		
Action:	Seize Delay Release	
Priority:	Medium(2)	
Resources:		
<div>Resource, Tecnico Acabamento, 1</div> <div><End of list></div> <div>Add... Edit... Delete</div>		
Delay Type:	Units:	Allocation:
Triangular	Hours	Value Added
Minimum:	Value (Most Likely):	Maximum:
0.16	0.5	0.75
<input checked="" type="checkbox"/> Report Statistics		

Figura 4.19 – Módulo process “Acabamento”.

Conforme é possível observar pela Figura 4.19, ao módulo *process* “Acabamento” está associado ao recurso “Tecnico Acabamento” que corresponde ao técnico responsável pela fase de Acabamento e é definida a ação lógica *seize-delay-release* cujo *delay* é de valor acrescentado (*Value Added*) e é modelado através de uma distribuição Triangular de parâmetros 0,16, 0,5 e 0,75 horas como estimativas dos valores mínimo, médio e máximo, respetivamente.

A Figura 4.20 ilustra o preenchimento dos parâmetros relativos ao módulo *process* “RE Acabamento” que modela a fase de Acabamento associada a retrabalhos de pintura.

The screenshot shows a 'Process' dialog box with the following fields and values:

- Name:** RE Acabamento
- Type:** Standard
- Logic:**
 - Action:** Seize Delay Release
 - Priority:** High(1)
- Resources:**
 - Resource, Tecnico Acabamento, 1
 - <End of list>
 - Buttons: Add..., Edit..., Delete
- Delay Type:** Triangular
- Units:** Hours
- Allocation:** Non-Value Added
- Minimum:** 0.16
- Value (Most Likely):** 0.5
- Maximum:** 0.75
- ☒ Report Statistics

Figura 4.20 – Módulo process “RE Acabamento”.

O módulo *process* “RE Acabamento” é em todo idêntico ao módulo *process* “Acabamento” à exceção dos campos *Priority* e *Allocation*. Uma vez que este módulo modela os retrabalhos de pintura que são realizados pelo mesmo técnico responsável pela fase de Acabamento, é dada às viaturas que estão nestas circunstâncias uma prioridade *High (1)* na ocupação do recurso face àquelas que entram no módulo *process* “Acabamento”, cuja prioridade é *Medium (2)*. Assim, caso o técnico responsável pela fase de Acabamento esteja disponível, uma viatura que solicita um trabalho na fase de Acabamento e uma viatura que solicita um retrabalho na fase de Acabamento, o recurso é atribuído à viatura que solicita o retrabalho na fase de Acabamento. Como o módulo *process* “RE Acabamento” representa um retrabalho de pintura que não acrescenta valor para o cliente, no campo *Allocation* é selecionada a opção *Non-Value Added*.

4.2.8. Lavagem

A fase de Lavagem foi modelada segundo uma distribuição Uniforme de valor mínimo 1 hora e valor máximo de 1,5 horas. As estimativas foram feitas com base no período de recolha dos dados.

A Figura 4.21 ilustra o preenchimento dos parâmetros relativos ao módulo *process* “Lavagem” que modela a fase de Lavagem.

Conforme se pode observar pela Figura 4.21, ao módulo *process* “Lavagem” não está associado qualquer recurso pelo que, é definida uma ação lógica *delay* é de valor não acrescentado (*Non-Value Added*) e é modelado por uma distribuição de probabilidade Uniforme de parâmetros 1 e 1,5 horas. Esta fase do processo é de valor não acrescentado para a oficina uma vez que o cliente paga apenas pelas horas de trabalho previstas nas secções de chapa e pintura.

The screenshot shows a 'Process' dialog box with the following fields:

- Name:** Lavagem (dropdown menu)
- Type:** Standard (dropdown menu)
- Logic:**
 - Action:** Delay (dropdown menu)
- Delay Type:** Uniform (dropdown menu)
- Units:** Hours (dropdown menu)
- Allocation:** Non-Value Added (dropdown menu)
- Minimum:** 1 (text input)
- Maximum:** 1.5 (text input)
- ☒ Report Statistics

Figura 4.21 – Módulo process “Lavagem”.

4.2.9. Controlo

Por fim, a fase de Controlo foi modelada segundo uma distribuição Uniforme de valor mínimo 0,16 horas e valor máximo de 0,5 horas. As estimativas foram feitas com base no período de observação.

The screenshot shows a 'Process' dialog box with the following fields:

- Name:** Controlo (dropdown menu)
- Type:** Standard (dropdown menu)
- Logic:**
 - Action:** Seize Delay Release (dropdown menu)
 - Priority:** Medium(2) (dropdown menu)
- Resources:**
 - Resource, Tecnico Controlo, 1 (text input)
 - <End of list> (text input)
 - Add...** (button)
 - Edit...** (button)
 - Delete** (button)
- Delay Type:** Uniform (dropdown menu)
- Units:** Hours (dropdown menu)
- Allocation:** Non-Value Added (dropdown menu)
- Minimum:** 0.16 (text input)
- Maximum:** 0.5 (text input)
- ☒ Report Statistics

Figura 4.22 – Módulo process “Controlo”.

Conforme é possível observar pela Figura 4.22, ao módulo *process* “Controlo” está associado o recurso “Tecnico Controlo” que corresponde ao técnico responsável pela fase de Controlo e é definida a ação lógica *seize-delay-release* cujo *delay* é de valor não acrescentado (*Non-Value Added*) e é modelado

através de uma distribuição Uniforme de parâmetros 0,16 e 0,5 horas. Tal como na fase de Lavagem, a fase de Controlo é de valor não acrescentado para a oficina uma vez que o cliente paga apenas pelas horas de trabalho previstas nas secções de chapa e pintura.

4.3. Distribuições de probabilidade utilizadas

A Tabela 4.3 reúne as expressões das distribuições de probabilidade utilizadas para a modelação de todas as fases do processo. Note-se que é feita a distinção entre Desmontagem de duração média e duração longa, tal como, é feita a distinção entre a atividade exercida pelo técnico pintor e pelo cozimento da estufa na fase de Pintura.

Tabela 4.3 – Distribuições de probabilidade utilizadas na modelação das fases do processo.

Fase do processo		Expressão analítica da distribuição de probabilidade (horas)
Desmontagem	Média	Gamma~(1,02; 2,7)
	Longa	6 + Exponencial~(10,1)
Preparação de Pintura		Weibull~(5,15; 1,47)
Pintura	Pintor	Uniforme~(0,16; 0,33)
	Estufa	Erlang~(0,467; 6)
Montagem		Empírica
Acabamento		Triangular~(0,16; 0,5; 0,75)
Lavagem		Uniforme~(1; 1,5)
Controlo		Uniforme~(0,16; 0,5)

4.4. Síntese do capítulo

Neste capítulo foram abordados os aspetos inerentes à modelação do funcionamento atual da oficina, nomeadamente, a modelação estrutural e a modelação quantitativa. A primeira diz respeito à modelação da lógica e da sequência das fases do processo no modelo de simulação, feita com base em pressupostos assumidos e no mapa conceptual do processo (Figura 3.4). São também definidas as entidades que irão percorrer o modelo e são caracterizados os recursos associados às fases do processo. A segunda diz respeito ao ajustamento das fases do processo a distribuições de probabilidade, recorrendo, para o efeito, a uma análise exploratória dos dados recolhidos e à aplicação do *software* ARENA, o *Input Analyzer*, para testar as hipóteses de ajustamento com base nos *p-value* dos testes do QQ e do K-S. Uma vez modelado o processo a nível estrutural e quantitativa, considera-se que o desenvolvimento do modelo de simulação está concluído, podendo ser efetuado o estudo de simulação da oficina.

5. Estudo de simulação e outras propostas de melhoria

O estudo de simulação para o presente caso de estudo será feito para um mês de trabalho, correspondente a 20 dias úteis (160 horas). Neste capítulo, são determinados os parâmetros do estudo de simulação e é feita a validação do modelo de simulação. Depois é desenvolvido um modelo de simulação alternativo (modelo A) ao atual que visa a redução do tempo médio de valor não acrescentado (ou seja, o tempo associado aos módulos *process* de *Allocation Non-Value Added*), pelo que, segundo o pensamento *lean* (PL), significa um aumento do valor do serviço prestado ao cliente. É também explorado outro modelo alternativo (modelo B), no qual, é acrescentado um técnico à equipa de secção de chapa, como forma de reduzir os tempos médios de uma viatura nas filas de espera associados às fases de Desmontagem e Montagem.

5.1. Modelo atual

No presente subcapítulo, são determinados o período de *warm-up* e o número de replicações (R) a realizar no modelo atual, através da análise da medida de desempenho *Work in Progress* (WIP). Depois é feita a validação do modelo através da comparação do número de viaturas reparadas mensalmente na oficina e no modelo.

5.1.1. Parâmetros da simulação

O estudo de simulação é do tipo *steady-state*, pelo que é feita uma corrida de simulação suficientemente longa para que o modelo atinja o estado estacionário. Assim, é feita uma corrida para 20 dias de trabalho (1 mês) e é analisada graficamente a evolução temporal da medida de desempenho WIP, através de um gráfico gerado pelo *Output Analyzer*. Para a determinação do período de *warm-up*, deve ser corrido um número arbitrário de replicações no modelo de simulação, pelo que são realizadas 10 replicações, tal como é possível verificar no menu *Run Setup* ilustrado pela Figura 5.1.

Replication Parameters

Number of Replications: 10

Initialize Between Replications
☒ Statistics ☒ System

Start Date and Time:

Warm-up Period: 0 Time Units: Hours

Replication Length: 20 Time Units: Days

Hours Per Day: 8

Base Time Units: Hours

Terminating Condition:

Figura 5.1 – *Run Setup* do modelo atual sem período de *warm-up*.

Assim, conforme ilustrado na Figura 5.1, são corridas 10 replicações (*Number of Replications*), com uma duração de 20 dias (*replication length*) e um período de *warm-up* de 0 horas. É definido que um dia corresponde a 8 horas (*Hours Per Day*) e que as unidades das estatísticas no relatório gerado pelo software ARENA são em horas (*Base Time Units*). Importa também referir que o estado do sistema e as estatísticas das variáveis do modelo são reiniciadas após cada replicação (*Initialize Between Replications*) e que não existe alguma condição de paragem nas corridas de simulação (*Terminating Condition*).

Para que os valores da medida de desempenho WIP sejam registados ao longo do tempo para as 10 corridas de simulação, foi criada uma linha no *Data Module* de designação *Statistic* no separador *Advanced Processo*. No Anexo C.1. encontra-se o preenchimento dos parâmetros no módulo *Statistic* para o registo dos valores do WIP no modelo atual.

As corridas das 10 replicações do modelo de simulação resultam na criação de um ficheiro com extensão “.dat”, com os dados que servirão de *input* ao *Output Analyzer*. No Anexo C.1., é apresentada uma breve descrição dos procedimentos a realizar no *Output Analyzer* para gerar o gráfico com a evolução temporal da medida de desempenho WIP.

A evolução temporal da medida de desempenho WIP das 10 replicações, apresentada na Figura 5.2, foi obtida com recurso ao *Output Analyzer*.

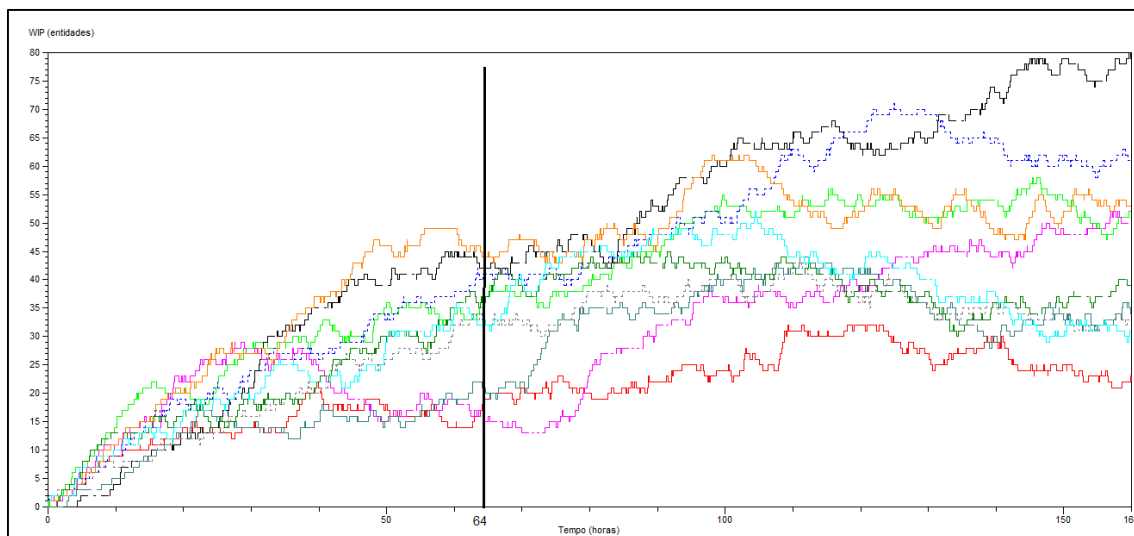


Figura 5.2 – Período de *warm-up* para o modelo atual.

Através da análise do gráfico da Figura 5.2, considera-se que o modelo atinge o estado estacionário ao fim de, aproximadamente, 64 horas que corresponde a 8 dias de trabalho.

Por conseguinte, o menu *Run Setup* deve ser alterado, tal como é evidenciado pela Figura 5.3, de tal modo que o campo correspondente ao período de *warm-up* (*Warm-up Period*) seja preenchido com 8 dias (*Time Units*), correspondente aos 8 dias necessários para o modelo atingir o estado estacionário. O tamanho da replicação (*replication length*) é incrementado de 8 dias, passando a ser de 28 dias

porque, durante o período de *warm-up*, não são recolhidas estatísticas. Logo, a duração da simulação permanece para um mês de trabalho, ou seja, 20 dias.

Warm-up Period:	Time Units:
<input type="text" value="8"/>	Days <input type="button" value="v"/>
Replication Length:	Time Units:
<input type="text" value="28"/>	Days <input type="button" value="v"/>
Hours Per Day:	
<input type="text" value="8"/>	
Base Time Units:	
Hours <input type="button" value="v"/>	

Figura 5.3 – *Run Setup* do modelo atual com o período de *warm-up*.

Procede-se com a determinação do número de replicações a correr no modelo de simulação, através das aproximações apresentadas no subcapítulo 2.3.7.

Para o cálculo do número de replicações, são também corridas 10 replicações para os mesmos parâmetros (Figura 5.3) e, através das aproximações apresentadas no subcapítulo 2.3.7, é determinado o número de replicações a executar no modelo de simulação, para um dado nível de significância (α) de 5%.

A Tabela 5.1 resume os resultados obtidos pelas 10 replicações (aproximados com duas casas decimais) para a média das médias da medida de desempenho WIP (\overline{WIP}) em cada replicação, o respetivo valor do *half width* (h_0) para um nível de confiança ($1-\alpha$) de 95% e o desvio amostral (S) associado à média das médias da medida de desempenho WIP de cada replicação. Como o *software* ARENA não calcula desvios amostrais, este valor tem de ser determinado. A determinação do valor do desvio amostral (S) associado à média das médias da medida de desempenho WIP em cada replicação foi feita com base na equação (2.3) do subcapítulo 2.3.7. cujo cálculo se encontra no Anexo C.1.

Tabela 5.1 – Sumário estatístico de dez replicações para a medida de desempenho WIP

WIP (viaturas)	
Valor médio (\overline{WIP})	45,33
<i>Half width</i> (h_0)	9,30
Desvio amostral (S)	13,00

Assim, segundo a Tabela 5.1, o valor médio do WIP (\overline{WIP}) das 10 replicações é de 45,33 viaturas, com um *half width* (h_0) associado de 9,30 viaturas e um desvio amostral (S) de 13,00 viaturas.

A Tabela 5.2 reúne o número de replicações a executar no modelo de simulação (R) obtido através das aproximações apresentadas no subcapítulo 2.3.7., para um valor de *half width* arbitrário (h) de 4,5 horas e para uma precisão relativa de 10% e um nível de significância 5%.

Tabela 5.2 – Cálculo do número de replicações no modelo atual.

Aproximação	Estatísticas e pressupostos	Número de replicações (R)
$R \cong \left(\frac{t_{1-\frac{\alpha}{2}, R-1} * S}{h} \right)^2$	$t_{0,975; 9} = 2,262$ e $h = 4,5$ horas	43
$R \cong \left(\frac{z_{1-\frac{\alpha}{2}} * S}{h} \right)^2$	$z_{0,975} = 1,960$ e $h = 4,5$ horas	33
$R \cong R_0 * \left(\frac{h_0}{h} \right)^2$	$R_0 = 10$ replicações e $h = 4,5$ horas	43
$R = \left(\frac{t_{1-\frac{\alpha}{2}, R-1} * S}{\text{Precisão relativa} * \overline{WIP}} \right)^2$	$t_{0,975; 9} = 2,262$ e <i>Precisão relativa</i> = 10%	43

Assim, com base nas aproximações identificadas por (2.5), (2.6) e (2.7) no subcapítulo 2.3.7., o número de replicações a considerar no modelo de simulação é 43, 33 e 43, respetivamente. Analogamente, para a aproximação identificada por (2.8), com base numa precisão relativa de 10%, o número de replicações a considerar no modelo de simulação é 43. Como se pretende adotar uma perspetiva conservadora, deve-se optar pelo valor máximo do número de replicações obtido pelas várias aproximações. Logo, são corridas 43 replicações no modelo de simulação.

5.1.2. Validação do modelo de simulação

Para a validação do modelo de simulação, foi fornecido o número de viaturas reparadas mensalmente na oficina nos últimos 11 meses, pelo que, foram corridas 11 replicações de um mês (20 dias) de duração no modelo de simulação de modo a comparar os valores obtidos com o número de viaturas reparadas mensalmente na oficina.

No Anexo C.2. encontra-se a Tabela C.1 que reúne, por ordem crescente, o número de viaturas reparadas mensalmente na oficina e o número de viaturas reparadas mensalmente no modelo.

A Figura 5.4 apresenta o gráfico no qual é ilustrado, por ordem crescente, o número de viaturas reparadas mensalmente na oficina nos últimos 11 meses e o número de viaturas reparadas mensalmente no modelo em cada uma das 11 replicações.

Através da análise do gráfico da Figura 5.4, por inspeção, o modelo parece representar fidedignamente o sistema, pelo que, o modelo de simulação parece ser válido. Ainda assim, é necessário um argumento matemático para sustentar a validade do modelo.

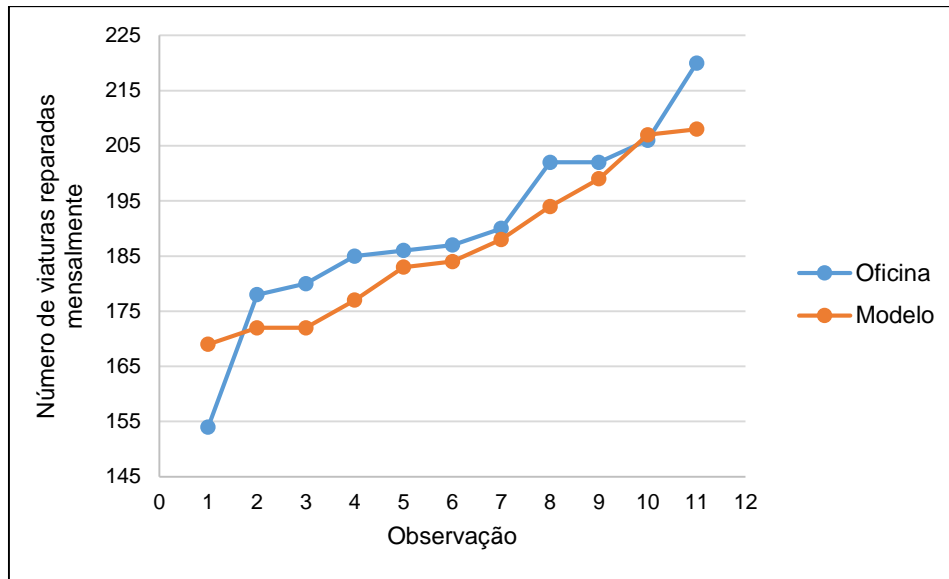


Figura 5.4 – Número de viaturas reparadas mensalmente na oficina e no modelo.

Na validação de um modelo de simulação, tal como exposto no subcapítulo 2.3.7., é estimado um intervalo para $(1-\alpha)\%$ de confiança centrado na diferença dos valores médios da medida de desempenho do sistema e do modelo e verificar se o valor 0 está contido nesse intervalo. Nesta abordagem, são assumidos pressupostos de normalidade dos dados que, segundo o Teorema do Limite Central, é garantido para amostras de dimensões superiores a 30 observações. Contudo, este pressuposto não pode ser tomado como válido, já que as dimensões das amostras são muito inferiores a 30 observações.

Por conseguinte, deve-se recorrer a um teste não paramétrico para verificar a hipótese de as medianas das populações das amostras do número de viaturas reparadas mensalmente na oficina e no modelo de simulação serem estatisticamente semelhantes para um dado nível de significância α . A adoção desta abordagem prende-se com o facto de que, em testes não paramétricos, não são assumidos quaisquer pressupostos acerca da distribuição de probabilidade das populações das quais provêm os dados.

O teste não paramétrico utilizado é o teste do *Mann-Whitney U Test* ou *Nonparametric Rank Sum Test* cuja hipótese nula e alternativa são as seguintes:

$$H_0: X_{0,5\text{Oficina}} - X_{0,5\text{Modelo}} = 0 .$$

$$H_1: X_{0,5\text{Oficina}} - X_{0,5\text{Modelo}} \neq 0.$$

Em que $X_{0,5\text{Oficina}}$ representa a mediana da população relativa ao número de viaturas reparadas mensalmente na oficina e $X_{0,5\text{Modelo}}$ representa a mediana da população relativa ao número de viaturas reparadas mensalmente no modelo simulação.

Se não existirem evidências estatísticas que contrariem a hipótese nula, então, poder-se-á considerar que, para um dado nível de significância α , a mediana das duas populações é estatisticamente semelhante, implicando a validação do modelo de simulação.

A Tabela 5.3 reúne o número de viaturas reparadas na oficina e no modelo por ordem crescente, o grupo de observações a que pertencem (oficina ou modelo) e o *rank* atribuído. Note-se que, em caso de empate no valor de duas observações, é atribuída a ponderação 0,5 ao valor do *rank*, prosseguindo a ordem natural da contagem. Por exemplo, o valor 172 corresponde a duas observações e às posições 3 e 4 do *ranking*, pelo que, é atribuído o valor médio entre 3 e 4 (3,5) às duas observações. A metodologia do *Mann-Whitney U Test* é descrita no Anexo A.10.

Tabela 5.3 – *Ranks* dos valores do número de viaturas reparadas na oficina e no modelo.

Número de viaturas reparadas	<i>Rank</i>	Grupo
154	1	Oficina
169	2	Modelo
172	3,5	Modelo
172	3,5	Modelo
177	4	Modelo
178	5	Oficina
180	6	Oficina
183	7	Modelo
184	8	Modelo
185	9	Oficina
186	10	Oficina
187	11	Oficina
188	12	Modelo
190	13	Oficina
194	14	Modelo
199	15	Modelo
202	16,5	Oficina
202	16,5	Oficina
206	17	Oficina
207	18	Modelo
208	19	Modelo
220	20	Oficina

Aplicando o *Mann-Whitney U Test* para um nível de significância de 5% obtém-se os valores de decisão contidos na Tabela 5.4, em que $U_{Oficina}$ é o valor U para o conjunto de observações da oficina, U_{Modelo} é o valor U para o conjunto de observações do modelo, \bar{n} é o valor da média das dimensões das duas amostras, S é a variância amostral do conjunto das duas observações e z_{Teste} é o valor crítico da

distribuição normal reduzida para $\alpha = 5\%$. O cálculo dos valores necessários à aplicação do *Mann-Whitney U Test* encontra-se no Anexo C.2.

Tabela 5.4 – Valores de decisão para o *Mann-Whitney U Test*.

$U_{Oficina}$	59
U_{Modelo}	40
U	40
\bar{n}	60,5
S	15,22
z_{Teste}	-1,35
Regra de decisão	$-1,96 < -1,35 < 1,96 \Rightarrow$ Não rejeitar H_0

Para um nível de significância de 5% conclui-se que não é rejeitada a hipótese de as medianas das populações das amostras do número viaturas reparadas mensalmente na oficina e no modelo de simulação serem estatisticamente semelhantes.

Logo, o modelo de simulação pode ser considerado válido, ou seja, o modelo representa fidedignamente a oficina para um nível de significância 5%. Portanto, as conclusões retiradas a partir do estudo de simulação do modelo (designado de modelo atual) serão igualmente válidas para a oficina, pelo que os valores recolhidos relativos às entidades do modelo podem ser traduzidos para valores relativos às viaturas na oficina. Adicionalmente poderão ser testadas alterações no modelo atual que visem uma melhoria no desempenho da oficina e, dadas as vantagens da simulação, é possível quantificar os ganhos resultantes da implementação dessas alterações.

5.1.3. Análise do modelo atual

Considerado como válido o modelo de simulação, importa determinar as medidas de desempenho, nomeadamente, o tempo médio de valor acrescentado de uma viatura, o tempo médio de valor não acrescentado de uma viatura, o tempo médio de espera de uma viatura, o tempo médio de permanência de uma viatura na oficina e, por fim, o número de viaturas reparadas mensalmente, para um nível de confiança de 95%.

Por conseguinte, a Tabela 5.5 contém os valores das médias, dos *half width* (aproximados com duas casas decimais) e os respetivos intervalos de confiança para um nível de confiança de 95% relativamente às medidas de desempenho i) tempo de valor acrescentado de uma viatura em horas, ii) tempo de valor não acrescentado de uma viatura em horas, iii) tempo de espera de uma viatura em horas, iv) tempo de permanência em horas de uma viatura na oficina e v) número de viaturas reparadas mensalmente. Os valores da Tabela 5.5 referem-se à média das médias das medidas de desempenho obtidas em cada uma das 43 replicações para 20 dias úteis de simulação (1 mês de trabalho). Note-se que foi dada a designação de tempo de valor não acrescentado aos tempos associados às fases do

processo modeladas pelos módulos *process* cuja opção do campo *Allocation* é *Non-Value Added*, ou seja, as fases de Lavagem, Controlo e de pintura associadas a retrabalhos.

Tabela 5.5 – Medidas de desempenho no modelo atual.

Medida de desempenho	Média	<i>Half width</i>	Intervalo de confiança
Tempo de valor acrescentado (horas)	12,80	0,24	[12,56; 13,04]
Tempo de valor não acrescentado (horas)	1,71	0,06	[1,65; 1,77]
Tempo de espera (horas)	16,66	2,22	[14,44; 18,88]
Tempo de permanência no modelo (horas)	31,17	2,29	[28,88; 33,46]
Número de viaturas reparadas mensalmente	191	4	[187; 195]

Assim, tal como é possível constatar pela Tabela 5.5, uma viatura que dá entrada na oficina para reparação tem um tempo de valor acrescentado mínimo de 12,56 horas, médio de 12,80 horas e máximo de 13,04 horas, para um nível de confiança de 95%.

Da mesma forma, o tempo de valor não acrescentado de uma viatura que entre na oficina para reparação é no mínimo de 1,65 horas, em média de 1,71 horas e no máximo de 1,77 horas, para um nível de confiança de 95%, tal como, o tempo de espera é no mínimo de 14,44 horas, em média de 16,66 horas e no máximo de 18,88 horas, para o mesmo nível de confiança. É de realçar que o tempo médio de espera de uma viatura também não acrescenta valor para o cliente, apesar de ter uma designação própria.

O tempo de permanência de uma viatura que entre na oficina para reparação é no mínimo de 28,88 horas (3,6 dias), em média de 31,17 horas (3,9 dias) e no máximo de 33,46 horas (4,2 dias), para 95% de confiança.

Por fim, durante o período de simulação (20 dias úteis) e para 95% de confiança foram reparadas no mínimo, 187 viaturas, em média 191 viaturas e no máximo de 195 viaturas.

Com base nos valores médios das medidas de desempenho são estabelecidos os seguintes indicadores:

- i) Percentagem de tempo médio não aproveitado ($\overline{TNA}(\%)$) definido pela equação (5.1).
- ii) Percentagem de tempo médio de valor acrescentado ($\overline{VA}(\%)$), definido pela equação (5.2).

$$\overline{TNA}(\%) = \frac{\overline{TVNA} + \overline{TE}}{\overline{TTotal}} * 100 \quad (5.1);$$

$$\overline{VA}(\%) = \frac{\overline{TVA}}{\overline{TTotal}} * 100 \quad (5.2).$$

Em que \overline{TVNA} corresponde ao tempo médio de valor não acrescentado de uma viatura, \overline{TE} ao tempo médio de espera de uma viatura, \overline{TVA} ao tempo médio de valor acrescentado de uma viatura e \overline{TTotal}

ao tempo médio de permanência de uma viatura na oficina. Note-se que se verifica a relação $\overline{TNA} = 1 - \overline{VA}$, já que $\overline{TTotal} = \overline{TVA} + \overline{TVNA} + \overline{TE}$.

A percentagem de tempo médio não aproveitado representa a percentagem do tempo médio de permanência de uma viatura em oficina que não acrescenta valor para o cliente. De forma complementar, entende-se por percentagem de tempo médio de valor acrescentado a percentagem do tempo médio de permanência de uma viatura na oficina que acrescenta valor para o cliente.

Assim, para o modelo atual e, por conseguinte, para a oficina, as percentagens de tempo médio não aproveitado e de tempo médio de valor acrescentado são 59% e 41%, respetivamente.

Seguidamente, é desenvolvido um modelo alternativo a partir do qual se pretende reduzir a percentagem de tempo não aproveitado, ou seja, reduzir o tempo médio de valor não acrescentado de uma viatura através da eliminação de fases no processo que não acrescentam valor para o cliente final.

5.2. Modelo A

De forma a reduzir a média do tempo de valor não acrescentado de uma viatura e, consequentemente, a média do tempo de permanência de uma viatura em oficina, é desenvolvido um modelo de simulação alternativo ao atual, denominado de modelo A, no qual, são eliminadas fases do processo que não acrescentam valor no serviço prestado ao cliente, isto é, são eliminados alguns módulos *process* cuja *Allocation* é *Non-Value Added*. Sendo o modelo de simulação considerado válido, o modelo A será comparado com o modelo atual de forma a averiguar se houve uma redução significativa na média dos tempos de valor não acrescentado de uma viatura.

5.2.1. Sugestão de melhoria

Na situação atual, a viatura dá entrada duas vezes na oficina: uma primeira vez quando entra para reparação e uma segunda vez quando regressa da fase de Lavagem. Da mesma forma, a viatura sai duas vezes da oficina: uma vez quando é encaminhada para a fase de Lavagem e uma última quando abandona definitivamente a oficina após a fase de Controlo para ser entregue ao cliente.

A fase de Controlo tem como finalidade a deteção de inconformidades no trabalho de pintura, de forma a garantir que a viatura seja entregue ao cliente nos requisitos de qualidade exigidos. Apesar de a fase de Controlo ser necessária, na medida em que garante a entrega da viatura em conformidade com os requisitos de qualidade, não acrescenta valor para o cliente. Logo, deverá ser eliminada do processo, sem comprometer, no entanto, os padrões de qualidade.

Durante o período de observação, verificou-se que a causa da maioria dos retrabalhos de pintura era devido à escolha incorreta na cor da tinta da viatura. Além do mais, as inconformidades nos trabalhos de pintura eram apenas detetadas quando era feito o controlo de qualidade, ou seja, no final do processo.

Assim, como sugestão de melhoria, propõe-se eleger um responsável pela secção de pintura cuja função seria gerir e apoiar os técnicos da respetiva secção. O responsável pela secção de pintura

deverá ser alguém conhecedor do processo de pintura de forma a auxiliar os técnicos em caso de dúvida na escolha da cor da tinta da viatura. Com esta sugestão de melhoria, pretende-se aumentar a eficácia do processo pela redução do número de retrabalhos de pintura devido a escolhas incorretas na cor da tinta da viatura e, consequentemente, a sua eficiência pela redução dos tempos médios associados a retrabalhos de pintura.

Não obstante, no caso de se verificarem inconformidades nos trabalhos de pintura na viatura, o responsável poderá detetar imediatamente a inconformidade, tomando ações para que esta seja logo corrigida, impedindo que a viatura avance para as restantes fases do processo. Assim, no caso de ser necessário efetuar um retrabalho de pintura, a viatura voltará a estar apenas sujeita às fases de Preparação de Pintura e Pintura, deixando de ser necessário um retrabalho na fase de Acabamento, o que se traduz numa resposta mais rápida por parte da oficina na correção das inconformidades dos trabalhos de pintura.

Com a eliminação da fase de Controlo pela eleição de um responsável de pintura, deixaria de haver a necessidade da viatura regressar à oficina após a fase de Lavagem, pelo que a viatura daria entrada apenas uma vez em oficina (quando entra para reparação) e sairia apenas uma vez para a fase de Lavagem e posterior entrega ao cliente, diminuindo, assim, o número de movimentações a que uma viatura está sujeita durante o processo de reparação e, consequentemente, a dependência (precedências) entre as várias fases do processo.

Logo, a implementação da proposta sugerida possibilita um processo produtivo mais eficaz, através da redução do número de inconformidades associadas a Retrabalhos de pintura, e eficiente, através da eliminação de fases do processo que não são de valor acrescentado para o cliente, como as fases de Controlo e de Acabamento associada a retrabalhos de pintura, implicando uma redução dos tempos de valor não acrescentado para a oficina.

Segundo o PL, esta redução de tempos de valor não acrescentado significa um aumento do valor do serviço prestado ao cliente. Em termos práticos, o aumento do valor do serviço da reparação automóvel através da redução do número de retrabalhos e dos tempos associados, traduz-se numa maior probabilidade de cumprir as horas de trabalho previstas, o que implica a redução do número de atrasos e, consequentemente, dos custos associados às viaturas de cortesia. Assim, ao tornar o processo mais eficaz e eficiente, haverá uma maior satisfação dos clientes, potenciando uma melhoria na imagem da oficina e uma durabilidade na relação entre o cliente e a oficina.

Seguidamente, com base na sugestão de melhoria apresentada, é desenvolvido o modelo de simulação alternativo de forma a quantificar os ganhos em termos de tempo médio de valor não acrescentado de uma viatura e tempo médio de permanência de uma viatura na oficina.

5.2.2. Desenvolvimento do modelo A

É desenvolvido um modelo alternativo ao atual no qual são implementadas as sugestões supramencionadas. Ao modelo alternativo, é dada a designação de modelo A. A modelação estrutural do modelo A é evidenciada na Figura 5.5, seguida de uma breve explicação. A modelação quantitativa

do modelo atual e do modelo A é idêntica, isto é, não foram alteradas quaisquer distribuições de probabilidade associadas às durações das fases do processo representadas pelos vários módulos *process*.

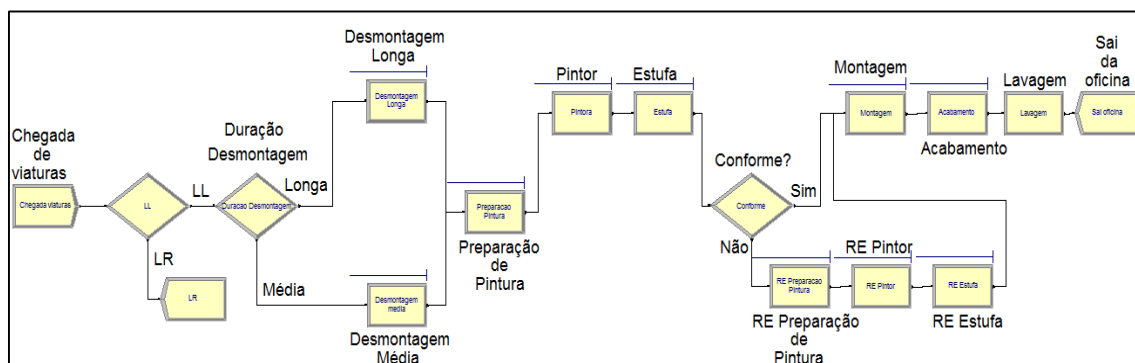


Figura 5.5 – Modelo A.

Como é possível constatar através da observação da Figura 5.5, os módulos *process* “Controlo” e “RE Acabamento” foram eliminados. Como na sugestão descrita, se forem detetadas inconformidades nos trabalhos de pintura da viatura após a sua saída da estufa, então, procede-se imediatamente a um retrabalho de pintura. Por conseguinte, é eliminada a necessidade de executar um retrabalho de pintura na fase de Acabamento, pelo que, o módulo *process* “RE Acabamento” é eliminado no modelo A.

Considera-se que a percentagem de retrabalhos é reduzida em 5%. Logo, no módulo *Decide* “Conforme”, a entidade seguirá o seu curso normal com 95% de probabilidade, isto é, visita a sequência de módulos *process* “Montagem”, “Acabamento” e “Lavagem”, abandonando, por fim, o modelo através do módulo *Dispose* “Sai oficina”. Com a probabilidade complementar (5%), a entidade será encaminhada para retrabalhos de pintura, isto é, para os módulos *process* “RE Preparacao Pintura”, “RE Pintor” e “RE Estufa” seguindo, posteriormente, o seu curso normal, ou seja, visita os módulos *process* que modelam as restantes fases do processo.

Relembre-se que também devem ser determinados o período de *warm-up* e o número de replicações a correr no modelo A. Assim, verificou-se um período de *warm-up* também de 8 dias e estimaram-se 35 replicações a efetuar no modelo A, tal como é possível verificar no Anexo C.3. Porém, tal como descrito no subcapítulo 2.3.7, na comparação de diferentes modelos, deve ser efetuado em todos eles o máximo do número de replicações estimadas para cada um. Logo, para o modelo A, serão também corridas 43 replicações.

A Tabela 5.6, à semelhança da Tabela 5.5 referente ao modelo atual, contém os valores das médias, dos *half width* (aproximados com duas casas decimais) e os respetivos intervalos para 95% de confiança, em relação às medidas de desempenho i) tempo de valor acrescentado de uma viatura em horas, ii) tempo de valor não acrescentado de uma viatura em horas, iii) tempo de espera de uma viatura em horas, iv) tempo de permanência de uma viatura na oficina em horas e v) número de viaturas reparadas mensalmente no modelo A. Os valores da Tabela 5.6 referem-se à média das médias das

medidas de desempenho obtidas em cada uma das 43 replicações de 20 dias úteis de simulação, de modo a serem comparados com os valores do modelo atual.

Tabela 5.6 – Medidas de desempenho no modelo A

Medida de desempenho	Média	<i>Half width</i>	Intervalo de confiança
Tempo de valor acrescentado (horas)	12,71	0,20	[12,51; 12,91]
Tempo de valor não acrescentado (horas)	1,18	0,04	[1,14; 1,22]
Tempo de espera (horas)	13,68	2,10	[11,58; 15,78]
Tempo de permanência no modelo (horas)	27,57	2,17	[25,40; 29,74]
Número de viaturas reparadas mensalmente	192,09	4,29	[187,80; 196,38]

Como é possível constatar pela observação da Tabela 5.6, no modelo A, uma viatura terá um tempo de valor acrescentado mínimo de 12,51 horas, médio de 12,71 horas e máximo de 12,91 horas, para um nível de confiança de 95%, assim como, um tempo de valor não acrescentado mínimo de 1,14 horas, médio de 1,18 horas e máximo de 1,22 horas, para o mesmo nível de confiança.

O tempo de espera de uma viatura é, no mínimo, de 11,58 horas, em média de 13,68 horas e no máximo de 15,78 horas, para um nível de confiança de 95%.

O tempo de permanência de uma viatura no sistema modelado através do modelo A é no mínimo de 25,40 horas (3,2 dias), em média de 27,57 horas (3,4 dias) e no máximo de 29,74 horas (3,7 dias), para 95% de confiança.

Por fim, foram reparadas no modelo A no mínimo 188 viaturas, em média 192 viaturas e no máximo 196 viaturas, para 95% de confiança (valores aproximados à unidade).

A Tabela 5.7 permite fazer uma análise comparativa dos valores dos indicadores percentagem de tempo não aproveitado (5.1) e percentagem de tempo de valor acrescentado (5.2) do modelo atual e do modelo A.

Tabela 5.7 – Indicadores do modelo atual e do modelo A.

Indicador	Modelo atual	Modelo A
$\overline{TNA}(\%)$	59	54
$\overline{VA}(\%)$	41	46

Verifica-se a partir da Tabela 5.7 uma redução na percentagem de tempo não aproveitado e um aumento na percentagem de tempo de valor acrescentado no modelo A face ao modelo atual em 5%. Logo, o modelo A é mais eficaz e eficiente do que o modelo atual, pois a percentagem do tempo de valor acrescentado é maior no modelo A do que no modelo atual, para 95% de confiança.

Seguidamente é realizado um teste de hipóteses para averiguar se as diferenças dos valores médios das medidas de desempenho são estatisticamente semelhantes no modelo atual e no modelo A, para um nível de significância de 5%.

5.2.3. Comparação do modelo atual com o modelo A

A Tabela 5.8 reúne as médias das medidas de desempenho em análise no modelo atual e no modelo A e o respetivo desvio percentual ($\partial(\%)$) definido pela equação (5.3):

$$\partial(\%) = \frac{\overline{\text{Medida de desempenho}}_A - \overline{\text{Medida de desempenho}}_{\text{Atual}}}{\overline{\text{Medida de desempenho}}_{\text{Atual}}} \times 100 \quad (5.3)$$

Em que $\overline{\text{Medida de desempenho}}_A$ corresponde à média da medida de desempenho no modelo A, $\overline{\text{Medida de desempenho}}_{\text{Atual}}$ corresponde à média da medida de desempenho no modelo atual.

Se o valor do desvio percentual for maior que 0, então, significa que houve um aumento no valor da medida de desempenho no modelo A em relação ao modelo atual. Caso contrário, se o valor do desvio percentual for menor que 0, então, significa que houve uma redução no valor médio da medida de desempenho no modelo A em relação ao modelo atual.

Tabela 5.8 – Desvio percentual das médias das medidas de desempenho no modelo A em relação ao modelo atual.

Medida de desempenho	Média modelo atual	Média modelo A	Desvio percentual (%)
Tempo de valor acrescentado (horas)	12,80	12,71	-0,7
Tempo de valor não acrescentado (horas)	1,71	1,18	-31,0
Tempo na fila de espera (horas)	16,66	13,68	-17,9
Tempo de permanência no modelo (horas)	31,17	27,57	-11,5
Número de viaturas reparadas mensalmente	191,09	192,09	0,5

Verifica-se a partir da Tabela 5.8 uma redução de 0,7% no tempo médio de valor acrescentado de uma viatura, uma redução 31,0% no tempo médio de valor não acrescentado de uma viatura, uma redução de 17,9% no tempo médio de espera de uma viatura, uma redução de 11,5% no tempo médio de permanência de uma viatura na oficina e um aumento de 0,5% no número médio de viaturas reparadas mensalmente no modelo A em relação ao modelo atual.

De seguida, é feita a comparação entre o valor médio do tempo de valor não acrescentado no modelo A e o valor médio do tempo de valor não acrescentado no modelo atual. Os procedimentos para as restantes medidas de desempenho são idênticos.

Para comprovar que o valor médio do tempo de valor não acrescentado de uma viatura no modelo A não é estatisticamente semelhante ao valor médio do tempo de valor não acrescentado de uma viatura

no modelo atual, é feito um teste de hipóteses, para um nível de significância de 5%, em que são definidas as hipóteses nula e alternativa seguintes:

$$H_0: \mu_{TVNA_{Atual}} - \mu_{TVNA_A} = 0$$

$$H_1: \mu_{TVNA_{Atual}} - \mu_{TVNA_A} \neq 0.$$

Em que $\mu_{TVNA_{Atual}}$ representa o valor médio do tempo de valor não acrescentado de uma viatura no modelo atual e μ_{TVNA_A} representa o valor médio do tempo de valor não acrescentado de uma viatura no modelo A.

Se se verificar a rejeição da hipótese nula, então pode concluir-se que o modelo A é mais eficaz e eficiente do que o modelo atual para um nível de significância de 5%, já que o teste rejeita a hipótese de os valores médios dos tempos de valor não acrescentado de uma viatura no modelo atual e no modelo A serem estatisticamente semelhantes e sabendo *a priori* que houve uma redução de 31% no tempo médio de valor não acrescentado de uma viatura no modelo A em relação ao modelo atual.

Como descrito no subcapítulo 2.3.7 é dada preferência à definição de um intervalo de confiança centrado na diferença entre os dois valores médios, pois fornece a mesma informação do que o teste de hipóteses homólogo e, ainda, fornece a magnitude de quanto $\mu_{TVNA_{Atual}}$ difere de μ_{TVNA_A} .

Como os valores médios a serem comparados resultam da média das médias do tempo de valor não acrescentado das 43 replicações, os pressupostos de normalidade podem ser tomados como válidos pelo Teorema do Limite Central uma vez que existem 43 observações, uma por cada replicação. Logo, é utilizado um teste paramétrico para a definição do intervalo de confiança centrado na diferença dos dois valores médios. Para tal, recorre-se ao *Output Analyzer*, no qual se utiliza o *Paired-t Test*.

À semelhança do que foi feito na determinação do período de *warm-up*, foi criada uma linha no *Data Module* de designação *Statistic* para o registo do valor médio do tempo de valor não acrescentado em ambos os modelos. No Anexo C.3., é possível encontrar a explicação do preenchimento dos parâmetros da linha do *Statistic* no modelo atual. A explicação e os parâmetros a preencher neste *Data Module* são em todo idênticos para o modelo A.

Criadas as linhas no *Statistic* em ambos os modelos, são corridas as 43 replicações de modo que os ficheiros de extensão “.dat” gerados possam ser utilizados pelo *Output Analyzer*, no qual deve ser selecionada a opção *Compare Means* do menu *Analyze* na barra de ferramentas. No Anexo C.3., é possível visualizar o preenchimento dos campos necessários à definição do intervalo de confiança para a diferença dos valores médios dos tempos de valor não acrescentado através do *Output Analyzer*.

Por fim, é determinado pelo *Output Analyzer* o intervalo para 95% de confiança para a diferença dos valores médios dos tempos de valor não acrescentado do modelo atual e do modelo A (Figura 5.6).

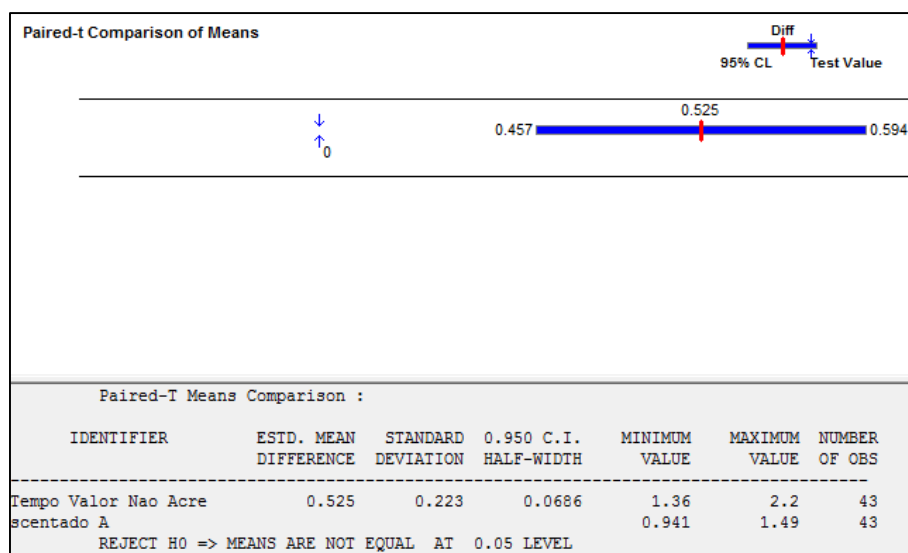


Figura 5.6 – Intervalo para 95% de confiança entre a diferença dos valores médios do tempo de valor não acrescentado no modelo atual e no modelo A.

Assim, pela implementação do modelo A, é de esperar uma redução no valor médio do tempo de valor não acrescentado de uma viatura de mínimo no 0,46 horas, em média 0,53 horas e no máximo 0,59 horas, ou seja, o intervalo de confiança para a diferença dos valores médios de tempo de valor não acrescentado no modelo atual e no modelo A é definido por:

$$IC_{95\%}(\mu_{TVNA_{Atual}} - \mu_{TVNA_{Alternativo}}) = [0,46; 0,59] \text{ (horas)}.$$

Repare-se que os valores do intervalo são positivos, o que significa que o valor médio do tempo de valor não acrescentado de uma viatura no modelo atual é maior do que o valor médio do tempo de valor não acrescentado de uma viatura no modelo A, para 95% de confiança.

Uma vez que o valor 0 não está contido no intervalo para 95% de confiança, é rejeitada a hipótese de os valores médios dos tempos de valor não acrescentado de uma viatura no modelo atual e no modelo A serem estatisticamente semelhantes para um nível de significância de 5%.

Assim, o modelo A implica, para 95% de confiança, uma redução de 0,46 horas no tempo médio de valor não acrescentado de uma viatura no pior cenário, ou seja, num cenário pessimista. Da mesma forma, o modelo A implica uma redução de 0,53 horas no tempo médio de valor não acrescentado de uma viatura num cenário moderado e uma redução de 0,59 horas no tempo médio de valor não acrescentado de uma viatura no melhor cenário, ou seja, num cenário otimista, para 95% de confiança.

Logo, é confirmada a hipótese de que o modelo A é mais eficaz e, consequentemente, mais eficiente do que o modelo atual na medida em que a sugestão de melhoria contribui para a redução do tempo médio de valor não acrescentado de uma viatura, mesmo num cenário pessimista. Assim, pela implementação do modelo A, é possível melhorar a imagem da oficina junto dos clientes e, consequentemente, aumentar o valor do serviço de reparação automóvel prestado, já que o tempo médio de valor não acrescentado de uma viatura, ou seja, o tempo médio associado a fases do processo que não acrescentam valor no serviço de reparação automóvel, é reduzido. Portanto, a

implementação do modelo A poderá levar a um maior número de trabalhos cumpridos nas horas previstas, traduzindo-se numa redução dos custos associados à cedência de viaturas de cortesia devido a atrasos na produção.

Da mesma forma, são definidos os intervalos para 95% de confiança centrados na diferença entre os valores médios das medidas de desempenho i) tempo de valor acrescentado de uma viatura, ii) tempo de espera de uma viatura, iii) tempo de permanência de uma viatura na oficina e iv) número de viaturas reparadas mensalmente, para o modelo atual e o modelo A, tal como é possível constatar através da observação da Tabela 5.9. No Anexo C.3., é possível encontrar os intervalos definidos pelo *Output Analyzer* para a diferença entre cada par de medidas de desempenho no modelo atual e no modelo A. Relembre-se que os valores na Tabela 5.9 referem-se à média dos valores médios das medidas de desempenho das 43 replicações de duração de 20 dias úteis, ou seja, um mês de trabalho na oficina.

Tabela 5.9 – Intervalos para 95% de confiança para as diferenças dos valores médios das medidas de desempenho no modelo atual e no modelo A.

Medida de desempenho	Valor médio da diferença entre os valores médios	<i>Half width</i>	Intervalo de confiança
Tempo de valor acrescentado (horas)	0,09	0,25	[-0,16; 0,34]
Tempo de espera (horas)	2,98	3,22	[-0,24; 6,20]
Tempo de permanência no modelo (horas)	3,60	3,34	[0,26; 6,94]
Número de viaturas reparadas	-1,00	6,23	[-7,23; 5,23]

Conforme é possível constatar pela Tabela 5.9, não é rejeitada a hipótese, para um nível de significância de 5%, de os valores médios do tempo de valor acrescentado de uma viatura no modelo atual e no modelo A serem estatisticamente semelhantes. No entanto, a não rejeição da hipótese nula não invalida a hipótese de o modelo A ser mais eficaz e eficiente do que o modelo atual. No desenvolvimento do modelo A, apenas se eliminaram fases do processo que não acrescentam valor, não tendo sido adicionada alguma fase que acrescentasse valor. Logo, é de esperar a não rejeição da hipótese de os valores médios do tempo de valor acrescentado das viaturas em ambos os modelos ser estatisticamente semelhante, para um nível de significância de 5%.

Tal como para os valores médios dos tempos de valor acrescentado de uma viatura, também não é rejeitada a hipótese de os valores médios do tempo de espera de uma viatura serem estatisticamente semelhantes em ambos os modelos, para um nível de significância de 5%. Todavia, a não rejeição da hipótese nula não implica que os valores médios do tempo de espera de uma viatura no modelo atual e no modelo A sejam iguais. Tal como evidenciado pela Tabela 5.9, o modelo A implica num cenário pessimista um aumento de 0,24 horas (14 minutos), num cenário moderado uma redução de 2,98 horas e num cenário otimista uma redução de 6,20 horas no tempo médio de espera de uma viatura, para 95% de confiança. Uma vez que o modelo A é mais eficaz e eficiente do que o modelo atual, pelo facto de uma viatura estar sujeita, em média, a menores tempos de valor não acrescentado, considera-se

que o cenário pessimista em relação ao tempo médio de espera de uma viatura é irreal, já que a viatura está sujeita, em média, a menos tempos de esperas ao longo do processo, dada a eliminação das fases de Controlo e de Acabamento associado a retrabalhos de pintura e dada a redução do número de retrabalhos de pintura devido a escolhas incorretas na cor da tinta da viatura. Logo, apesar de não ser rejeitada a hipótese, para um nível de significância de 5%, de os valores médios do tempo de espera de uma viatura no modelo atual e no modelo A serem estatisticamente semelhantes, não se deve desprezar o facto de que o modelo A contribui para uma redução em média de 2,98 horas e no máximo de 6,20 horas no tempo médio de espera de uma viatura.

É rejeitada a hipótese de os valores médios do tempo de permanência de uma viatura no modelo atual e no modelo A serem estatisticamente semelhantes, para um nível de significância 5%. Assim, o modelo A implica, para 95% de confiança, uma redução de 0,26 horas num cenário pessimista, uma redução de 3,60 horas num cenário moderado e uma redução de 6,94 horas num cenário otimista no tempo médio de permanência de uma viatura na oficina. Uma vez que o número de retrabalhos de pintura é reduzido e que as fases de Controlo e de Acabamento para retrabalhos de pintura são eliminadas, a viatura permanece, em média, menos tempo em oficina. Logo, a rejeição da hipótese de os valores médios do tempo de permanência de uma viatura na oficina no modelo atual e no modelo A serem estatisticamente semelhantes suporta a hipótese de que o modelo A é mais eficaz e eficiente do que o modelo atual, para um nível de significância 5%.

Por fim, não é rejeitada a hipótese de os valores médios do número de viaturas reparadas no modelo atual e no modelo A serem estatisticamente semelhantes, para um nível de significância 5%. Contudo, isso não significa que o número médio de viatura reparadas no modelo atual seja igual ao número médio de viaturas reparadas no modelo A. Tal como é possível constatar na Tabela 5.9, no modelo A verifica-se uma redução de 5 viaturas num cenário pessimista, um aumento de 1 viatura num cenário moderado e um aumento de 7 viaturas num cenário otimista, para o número de viaturas reparadas mensalmente, para um nível de confiança de 95%. Porém, uma vez que o valor médio do tempo de permanência de uma viatura em oficina no modelo A é menor do que o valor médio do tempo de permanência de uma viatura em oficina no modelo atual, não é de esperar que se verifique uma redução no número médio de viaturas reparadas mensalmente, para um nível de significância de 5%. Logo, dado o aumento de eficácia e de eficiência, considera-se que o cenário pessimista em relação ao número médio de viaturas reparadas mensalmente no modelo A é irreal.

Em suma, na implementação do modelo A é de esperar, para 95% de confiança e num cenário otimista, uma redução de 0,59 horas no tempo médio de valor não acrescentado de uma viatura, uma redução de 6,20 horas no tempo médio de espera de uma viatura, uma redução de 6,94 horas no tempo médio de permanência de uma viatura na oficina e um aumento de 5 viaturas no número de viaturas reparadas mensalmente. Num cenário moderado é de esperar, para 95% de confiança, uma redução de 0,53 horas no tempo médio de valor não acrescentado de uma viatura, uma redução de 2,98 horas no tempo médio de espera de uma viatura, uma redução de 3,60 horas no tempo médio de permanência de uma viatura na oficina e um aumento de 1 viatura no número de viaturas reparadas mensalmente.

Por fim, num cenário pessimista é de esperar, para 95% de confiança, uma redução de 0,46 horas no tempo médio de valor não acrescentado de uma viatura e uma redução de 0,26 horas no tempo médio de permanência de uma viatura na oficina.

O modelo A, ainda que se verifique um cenário pessimista, é mais eficaz e eficiente do que o modelo atual porque a proporção de viatura sujeitas a retrabalhos de pintura é menor e, consequentemente, os tempos médios de valor não acrescentado e de permanência de uma viatura na oficina são menores, o que contribui para uma melhoria na imagem da oficina junto dos seus clientes, já que possibilita uma redução do número de atrasos na entrega das viaturas aos clientes. Logo, segundo o PL, a implementação do modelo A possibilita um aumento no valor do serviço prestado ao cliente pela redução dos tempos médios de valor não acrescentado.

De seguida, é explorado o constrangimento do fluxo produtivo, através da análise dos tempos médios de uma viatura na fila de espera em cada fase do processo, de forma propor uma sugestão que vise a redução quer do tempo médio de espera das viaturas, quer do número médio de viaturas na fila de espera.

5.3. Modelo B

Ao analisar os tempos médios de uma viatura na fila de espera em cada fase do processo, é possível identificar o estrangulamento da produção (*bottleneck*) que corresponde à(s) fase(s) do processo nas quais se verificam os maiores tempos médios de uma viatura nas filas de espera. Posto isto, é desenvolvido um modelo alternativo ao atual (modelo B) que visa a redução dos tempos médios de uma viatura na fila de espera associados ao estrangulamento do processo.

5.3.1. Identificação do estrangulamento do processo

A Tabela 5.10 reúne a média, o *half width* associado e o respetivo intervalo para 95% de confiança dos vários tempos na fila de espera a que uma viatura está sujeita ao longo das várias fases do processo, isto é, nos diversos módulos do modelo de simulação no modelo atual que representa a oficina em estudo. Relembre-se que os valores da Tabela 5.10 se referem à média das médias das medidas de desempenho obtidas em cada uma das 43 replicações para 20 dias úteis de simulação (1 mês de trabalho).

O valor do *half width* em relação aos tempos de espera dos módulos *process* “Pintor” e “Controlo” é 0, pelo que não é possível definir um intervalo de confiança para o valor médio dos tempos de uma viatura na fila de espera para estas operações (“Insuficiente”).

Tal como é possível verificar na Tabela 5.10, os módulos com os valores mais elevados em relação ao tempo médio de uma viatura na fila de espera são os módulos *process* “Desmontagem Longa”, “Desmontagem media” e “Montagem”, que representam as fases do processo que ocorrem na secção de chapa. Logo, a secção de chapa representa o estrangulamento da produção, pelo que, é explorada a hipótese de acrescentar um técnico à equipa de chapa para avaliar quais são os benefícios que advém dessa alteração.

Tabela 5.10 – Tempos nas filas de espera nas fases do processo no modelo atual

Módulo	Média (horas)	Half width (horas)	Intervalo para 95% de confiança (horas)
Desmontagem Longa	8,88	1,85	[7,02; 10,72]
Desmontagem media	9,35	1,90	[7,42; 11,25]
Preparacao Pintura	1,51	0,39	[1,12; 1,90]
RE Preparacao Pintura	0,34	0,06	[0,28; 0,40]
Pintor	0,04	0,00	Insuficiente
RE Pintor	0,03	0,01	[0,02; 0,04]
Estufa	6,15	1,22	[4,93; 7,37]
RE Estufa	0,68	0,06	[0,62; 0,74]
Montagem	9,19	1,96	[7,23; 11,15]
Acabamento	0,18	0,02	[0,16; 0,20]
RE Acabamento	0,11	0,02	[0,09; 0,13]
Controlo	0,02	0,00	Insuficiente

Para explorar a hipótese de acrescentar um técnico na equipa da secção de chapa, recorre-se à ferramenta Processo *Analyzer*, onde são explorados dois modelos, nomeadamente:

1. O modelo atual, com 9 técnicos na equipa da secção de chapa;
2. O modelo B, idêntico ao modelo atual, mas com 10 técnicos na equipa da secção de chapa.

Como níveis dos fatores (*Controls*) são definidos os 9 técnicos da secção de chapa. Para o modelo atual, todos têm capacidade 1, já no modelo B, todos têm capacidade 1 exceto um com capacidade 2. O aumento da capacidade em algum técnico, em termos práticos, significa aumentar um técnico na equipa da secção de chapa.

Pretende-se estudar os efeitos (*Responses*) do acréscimo de um técnico na equipa de secção de chapa nos seguintes fatores:

- A. Número médio de viaturas na fila de espera para a fase de Desmontagem (módulo *process* “Desmontagem Longa”);
- B. Tempo médio, em horas, de uma viatura na fila de espera para a fase de Desmontagem (módulo *process* “Desmontagem Longa”);
- C. Número médio de viaturas na fila de espera para a fase de Desmontagem (módulo *process* “Desmontagem media”);
- D. Tempo médio, em horas, de uma viatura na fila de espera para a fase de Desmontagem (módulo *process* “Desmontagem media”);
- E. Número médio de viaturas na fila de espera para a fase de Montagem (módulo *process* “Montagem”);

- F. Tempo médio, em horas, de uma viatura na fila de espera para a fase de Montagem (módulo *process* “Montagem”);
- G. Número médio de viaturas reparadas mensalmente;
- H. Tempo médio de valor acrescentado de uma viatura em horas;
- I. Tempo médio de valor não acrescentado de uma viatura em horas;
- J. Tempo médio de espera de uma viatura em horas;
- K. Tempo médio de permanência de uma viatura na oficina em horas.

5.3.2. Análise do modelo B

O modelo atual representa o estado atual de funcionamento da oficina e o modelo B representa um cenário hipotético, no qual é acrescentado um técnico à equipa da secção de chapa. Pretende-se estudar o efeito do acréscimo na capacidade da secção de chapa nos fatores supramencionados. Note-se que não foram feitas alterações em termos estruturais no modelo B, apenas se incrementou em 1 unidade a capacidade de um recurso.

No modelo B, é também considerado um período *warm-up* de 8 dias. Estimaram-se 21 replicações a correr no modelo B mas, uma vez que na comparação de diferentes modelos deve ser escolhido o maior número de replicações a correr entre os dois, são também corridas 43 replicações no modelo B. No Anexo C.4. encontram-se os procedimentos na determinação dos parâmetros de simulação para o modelo B.

A Tabela 5.11 reúne os valores de cada efeito para o modelo atual e o modelo B e o desvio percentual do valor do modelo B em relação ao modelo atual, definido matematicamente pela equação (5.3).

Tabela 5.11 – Valores dos fatores no modelo atual e no modelo B.

Fatores (unidades)	Modelo atual	Modelo B	Desvio percentual (%)
A (viaturas)	2,34	1,20	-48,7%
B (horas)	8,88	4,39	-50,6%
C (viaturas)	7,08	3,50	-50,6%
D (horas)	9,35	4,60	-50,8%
E (viaturas)	8,35	4,23	-49,3%
F (horas)	9,19	4,56	-50,4%
G (viaturas)	191,09	198,16	3,7%
H (horas)	12,80	12,99	1,5%
I (horas)	1,71	1,73	1,2%
J (horas)	16,66	10,80	-35,2%
K (horas)	31,17	25,52	-18,1%

A partir da Tabela 5.11, verifica-se que um acréscimo de um técnico na equipa da secção de chapa, implicaria uma redução média de 50,1% no número médio de viaturas na fila de espera para a fase de Desmontagem (A e C) e uma redução média de 50,8% no tempo médio de uma viatura na fila de espera para a fase de Desmontagem (B e D). Relembre-se que 25% das viaturas estão sujeitas a desmontagens de duração longa (superior a 6,6 horas) e, de forma complementar, 75% das viaturas estão sujeitas a desmontagens de duração média (inferior a 6,6 horas). Portanto, a redução média de 50,1% no número médio de viaturas na fila de espera na fase de Desmontagem, representa a média ponderada entre 48,7% e 50,6%, tal como, a redução média de 51% no tempo médio de uma viatura na fila de espera para a fase de Desmontagem, representa a média ponderada entre 50,6% e 50,8%.

No tocante à fase de Montagem, com o acréscimo de um técnico na equipa da secção de chapa, espera-se uma redução de 49,3% do número médio de viaturas na fila de espera para a fase de Montagem (E) e uma redução de 50% no tempo médio de uma viatura na fila de espera para a fase de Montagem (F).

Ao acrescentar um técnico na equipa da secção de chapa, verifica-se que a oficina é capaz de aumentar o número de viaturas reparadas mensalmente (fator G) em 3,7%, o que sugere que o acréscimo de um técnico na equipa da secção de chapa contribui para o aumento do número de viaturas reparadas mensalmente na oficina.

Para os tempos médios de valor acrescentado (H) e de valor não acrescentado (I), verifica-se em ambos um aumento de 1,5% e 1,2%. Estes aumentos não são significativos, pois não foram acrescentadas nem eliminadas fases de valor acrescentado e de valor não acrescentado no desenvolvimento do modelo B.

O tempo médio de espera das viaturas no modelo B diminui cerca de 35,2% face ao modelo atual, tal como exibido na Tabela 5.11. Tal redução é expectável já que os tempos médios na fila de espera para as fases de Desmontagem e Montagem foram reduzidos para aproximadamente metade em relação ao modelo atual.

Por fim, verifica-se uma redução de 18,1% no tempo médio de permanência da viatura em oficina (K) no modelo B face ao modelo atual. A redução do tempo médio de permanência das viaturas no modelo B é uma consequência da redução dos tempos médios nas filas de espera para as fases de Desmontagem e Montagem.

A Tabela 5.12 compara os valores dos indicadores percentagem de tempo não aproveitado e percentagem de tempo de valor acrescentado do modelo atual e do modelo B.

Tabela 5.12 – Valores dos indicadores no modelo atual e no modelo B.

	Modelo atual	Modelo B
$\overline{TNA}(\%)$	59%	49%
$\overline{VA}(\%)$	41%	51%

Verifica-se a partir da Tabela 5.12 uma redução na percentagem de tempo não aproveitado e um aumento na percentagem de tempo de valor acrescentado no modelo B face ao modelo atual em 10%. Logo, o modelo B é mais eficaz e, portanto, mais eficiente do que o modelo atual, pois a percentagem do tempo de valor acrescentado é maior no modelo B do que no modelo atual, para 95% de confiança.

5.3.3. Comparação do modelo atual com o modelo B

À semelhança da metodologia aplicada na comparação das medidas de desempenho do modelo atual e do modelo A, são estimados os intervalos para 95% de confiança para testar se os valores médios dos efeitos dos fatores de A a K são estatisticamente semelhantes no modelo atual e no modelo B, o que equivale ao seguinte teste de hipóteses:

$$H_0: \mu_{Medida\ de\ desempenho_{Atual}} - \mu_{Medida\ de\ desempenho_B} = 0$$

$$H_1: \mu_{Medida\ de\ desempenho_{Atual}} - \mu_{Medida\ de\ desempenho_B} \neq 0.$$

Em que $\mu_{Medida\ de\ desempenho_{Atual}}$ corresponde ao valor médio da medida de desempenho no modelo atual e $\mu_{Medida\ de\ desempenho_B}$ corresponde ao valor médio da medida de desempenho no modelo B.

A Tabela 5.13 reúne os intervalos das diferenças dos valores médios dos efeitos dos fatores de A a K no modelo atual e no modelo B, para 95% de confiança, intervalos esses que foram também estimados recorrendo à aplicação *Output Analyzer*, onde foi também utilizado o *Paired-t Test*.

Tabela 5.13 – Intervalo para 95% de confiança para a diferença dos valores médios das medidas de desempenho no modelo atual e no modelo B.

Efeitos	Valor médio da diferença entre os valores médios	Half width	Intervalo de confiança
A (viaturas)	1,14	0,70	[0,44; 1,85]
B (horas)	4,49	2,32	[2,17; 6,81]
C (viaturas)	3,57	1,74	[1,83; 5,31]
D (horas)	4,75	2,37	[2,38; 7,12]
E (viaturas)	4,15	2,15	[2,00; 6,30]
F (horas)	4,63	2,45	[2,18; 7,08]
G (viaturas)	-7,07	6,04	[-13,11; -1,03]
H (horas)	-0,19	-0,30	[-0,49; 0,11]
I (horas)	-0,02	0,08	[-0,10; 0,06]
J (horas)	5,86	2,93	[2,93; 8,79]
K (horas)	5,65	3,03	[2,62; 8,68]

Tal como é possível verificar através da observação da Tabela 5.13, é rejeitada a hipótese, para um nível de significância de 5%, de o valor médio do número de viaturas na fila de espera para a fase de Desmontagem (fatores A e C) ser estatisticamente semelhante no modelo atual e no modelo B, assim

como, é rejeitada a hipótese, para o mesmo nível de significância, de o valor médio do tempo de uma viatura na fila de espera para a fase de Desmontagem ser estatisticamente semelhante no modelo atual e no modelo B (fatores B e D). Relembre-se que 75% das viaturas estão sujeitas a desmontagens de duração média e que 25% das viaturas estão sujeitas a desmontagens de duração longa, pelo que, é calculada a média ponderada para os valores dos fatores A e C, tal como, para os valores dos fatores B e D para a definição dos cenários otimista, moderado e pessimista para a fase de Desmontagem. Por exemplo, o valor 4 foi obtido pela média ponderada de 1,85 (número médio de viaturas na fila de espera para Desmontagem de duração longa no cenário otimista) e 5,31 (número médio de viaturas na fila de espera para Desmontagem de duração média no cenário otimista).

Por conseguinte, num cenário otimista, é de esperar uma redução de 4 viaturas (valor aproximado à unidade) no número médio de viaturas na fila de espera para a fase de Desmontagem e uma redução de 7,04 horas no tempo de uma viatura na fila de espera para a fase de Desmontagem, para 95% de confiança. Num cenário moderado, é de esperar uma redução de 3 viaturas (valor aproximado à unidade) no número médio de viaturas na fila de espera para a fase de Desmontagem e uma redução de 4,69 horas no tempo médio de uma viatura na fila de espera para a fase de Desmontagem, para o mesmo nível de confiança. Num cenário pessimista, é de esperar uma redução de 1 viatura (valor aproximado à unidade) no número médio de viaturas na fila de espera para a fase de Desmontagem e uma redução de 2,33 horas no tempo médio de uma viatura na fila de espera para a fase de Desmontagem, para o mesmo nível de confiança.

É também rejeitada a hipótese, para um nível de significância de 5%, de o valor médio do número de viaturas na fila de espera para a fase de Montagem (fator E) ser estatisticamente semelhante no modelo atual e no modelo B, tal como, é rejeitada a hipótese, para o mesmo nível de significância, de o valor médio do tempo de uma viatura na fila de espera para a fase de Montagem (fator F) ser estatisticamente semelhante no modelo atual e no modelo B.

Num cenário otimista, é de esperar uma redução de 6 viaturas (valor aproximado à unidade) no número médio de viaturas na fila de espera para a fase de Montagem e uma redução de 7,08 horas no tempo médio de uma viatura na fila de espera para a fase de Montagem, para 95% de confiança. Num cenário moderado, é de esperar uma redução de 4 viaturas (valor aproximado à unidade) no número médio de viaturas na fila de espera para a fase de Montagem e uma redução de 4,63 horas no tempo médio de uma viatura na fila de espera para a fase de Montagem, para o mesmo nível de confiança. Num cenário pessimista é de esperar, uma redução de 2 viaturas no número médio de viaturas na fila de espera para a fase de Montagem e uma redução de 2,18 horas no tempo médio de uma viatura na fila de espera para a fase de Montagem, para o mesmo nível de confiança.

Com o acréscimo de um técnico na equipa da secção de chapa, é rejeitada a hipótese de o valor médio do número de viaturas reparadas mensalmente (fator G) ser estatisticamente semelhante no modelo atual e no modelo B, para um nível de significância de 5%. Por conseguinte, num cenário otimista, é de esperar um aumento de 13 viaturas (valor aproximado à unidade) no número médio de viaturas reparadas mensalmente, para 95% de confiança. Num cenário moderado, é de esperar um aumento

de 7 viaturas (valor aproximado à unidade) no número médio de viaturas reparadas mensalmente, para o mesmo nível de confiança. Num cenário pessimista, é de esperar um aumento de 1 viatura (valor aproximado à unidade) no número médio de viaturas reparadas mensalmente, para o mesmo nível de confiança.

No entanto, não é rejeitada a hipótese, para um nível de significância de 5%, de os valores médios do tempo de valor acrescentado de uma viatura (fator H) e do tempo de valor não acrescentado de uma viatura (fator I) no modelo atual e no modelo B serem estatisticamente semelhantes, já que no desenvolvimento do modelo B, não foram adicionadas fases ao processo que acrescentassem valor nem foram eliminadas fases do processo que não acrescentassem valor.

É rejeitada a hipótese dos valores médios do tempo de espera de uma viatura (fator J) e do tempo de permanência de uma viatura (fator K) serem estatisticamente semelhantes no modelo atual e no modelo B, para um nível de significância de 5%. Assim, num cenário otimista, é de esperar uma redução de 8,79 horas no tempo médio de espera de uma viatura e uma redução de 8,68 horas no tempo médio de permanência de uma viatura na oficina, para 95% de confiança. Num cenário moderado, é de esperar uma redução de 5,86 horas no tempo médio de espera de uma viatura e uma redução de 5,65 horas no tempo médio de permanência de uma viatura na oficina, para o mesmo nível de confiança. Por fim, num cenário pessimista, é de esperar uma redução de 2,93 horas no tempo médio de espera de uma viatura e uma redução de 2,62 horas no tempo médio de permanência de uma viatura na oficina, para o mesmo nível de confiança.

Portanto, o acréscimo de um técnico à equipa da secção de chapa trará benefícios à oficina em termos de eficácia e de eficiência do processo produtivo, já que os tempos médios de uma viatura na fila de espera para as fases de Desmontagem e Montagem são significativamente menores no modelo B do que no modelo atual. Por conseguinte, o tempo médio de espera de uma viatura e o tempo médio de permanência de uma viatura na oficina são também significativamente menores no modelo B do que no modelo atual.

Assim, com o acréscimo de um técnico na equipa de secção de chapa, a oficina poderá contar com um processo mais eficaz e mais eficiente do que o atual, já que são significativamente reduzidos os tempos médios de uma viatura na fila de espera para as fases de Desmontagem e Montagem e, consequentemente, o tempo médio de espera de uma viatura e o tempo médio de permanência de uma viatura na oficina. Desta forma, a oficina proporciona uma melhor imagem junto dos seus clientes, potenciando a sua satisfação e a durabilidade da relação com estes e, ainda, possibilita uma redução no número de atrasos na entrega das viaturas aos clientes, traduzindo-se numa redução dos custos associados às viaturas de cortesia cedidas durante o período de reparação.

Logo, na implementação do modelo B, é de esperar um aumento no valor do serviço prestado pela redução dos tempos médios que não acrescentam valor ao cliente, nomeadamente, na redução do tempo médio de espera de uma viatura. Porém, dever-se-á ter em conta o custo de oportunidade na contratação de mais um técnico na equipa da secção de chapa, isto é, dever-se-á avaliar o custo desta alteração face ao ganho potencial.

5.4. Síntese do capítulo

No capítulo 5, foram determinados os parâmetros do estudo de simulação, nomeadamente, o período de *warm-up* e o número de replicações a correr no modelo de simulação. Procedeu-se à validação do modelo atual por meio de inspeção e por meio de um teste de hipóteses não paramétrico, como forma de validar, para um nível de 95% de confiança, se as medidas de desempenho resultantes do modelo de simulação correspondem às medidas de desempenho da oficina. Validado o modelo de simulação (denominado de modelo atual), é feito o levantamento de algumas medidas de desempenho de interesse no modelo atual e nos modelos alternativos, de forma a serem comparadas e, desse modo, verificar se houve algum ganho resultante da implementação das sugestões de melhoria. Os ganhos nas medidas de desempenho resultantes da implementação dos modelos A e B são quantificados por meio de intervalos de confiança, utilizando o *Paired-t Test* da aplicação *Output Analyzer*. Concluído o estudo de simulação, procede-se às conclusões da presente dissertação.

6. Conclusões

No capítulo final da presente dissertação são apresentados os ganhos resultantes da implementação dos modelos alternativos A e B, como também, são sugeridas outras propostas de melhoria com base em algumas ferramentas do pensamento *lean*, nomeadamente, o *Spaghetti Diagram*, 5S e *Kaizen*. Por fim, são referidas algumas limitações do estudo e são sugeridas propostas para trabalhos futuros na oficina.

6.1. Análise dos resultados obtidos

O objetivo primordial no desenvolvimento da presente dissertação era reduzir os tempos médios de permanência de uma viatura na oficina com base nas ferramentas do pensamento *lean*, pelo que, a gestão da organização solicitou uma recolha dos tempos de processamento das várias fases do processo de forma a identificar quais seriam as possíveis áreas de atuação, isto é, as oportunidades de melhoria. Contudo, verificou-se uma elevada variabilidade nos tempos de processamento nas várias fases do processo, pelo que, se concluiu que a simulação poderia cumprir não só objetivo delineado, como também quantificar os ganhos em termos de tempo resultantes da implementação das sugestões de melhoria.

Assim, foi desenvolvido um modelo de simulação válido, ou seja, um modelo que representa fidedignamente o funcionamento atual da oficina. Através deste, foi desenvolvido um modelo alternativo ao atual (modelo A) no qual se verifica uma redução do tempo médio de valor não acrescentado de uma viatura (tempo associado a fases do processo de valor não acrescentado, como a fase de Controlo ou retrabalhos de pintura) e a redução do tempo médio de permanência de uma viatura na oficina, através da eleição de um responsável pela secção de pintura. As funções do responsável pela secção de pintura seriam auxiliar os técnicos na escolha da cor da tinta da viatura e estar encarregue pelo controlo de qualidade dos trabalhos de pintura. Desta forma, o responsável poderá verificar a qualidade dos trabalhos de pintura após a saída das viaturas da estufa, o que permite não só eliminar a fase de Controlo no final do processo, como também eliminar a fase de Acabamento associada a retrabalhos de pintura. Como resultados desta eleição, o número de retrabalhos de pintura devido a escolhas incorretas na cor da tinta da viatura é reduzido, tal como, o número de movimentações a que uma viatura está sujeita durante o processo de reparação. Além do mais, através da eleição de um responsável pela secção de pintura, impede-se que a viatura avance ao longo do processo com inconformidades nos trabalhos de pintura, reduzindo, assim, a dependência das várias fases do processo, ou seja, o número de precedências. A gestão da oficina reconheceu e implementou esta sugestão.

Através do modelo atual, é possível identificar os estrangulamentos do processo, isto é, identificar as fases do processo que implicam maiores tempos médios de uma viatura na fila de espera. Assim, é desenvolvido um modelo alternativo ao atual (modelo B) no qual se prevê um acréscimo de um técnico na equipa da secção de chapa, já que as fases que nela ocorrem (Desmontagem e Montagem) são as que têm maiores tempos médios de uma viatura nas filas de espera. Verifica-se uma redução

significativa nos tempos médios de uma viatura nas filas de espera para as fases de Desmontagem e Montagem e, consequentemente, uma redução significativa quer no número médio de viaturas na fila de espera para as fases mencionadas, quer no tempo médio de permanência de uma viatura na oficina. Logo, o acréscimo de um técnico à equipa de secção de chapa resulta num nivelamento das várias fases do processo.

Portanto, considera-se que os objetivos delineados no capítulo 1 foram cumpridos e que os modelos desenvolvidos podem ser úteis à gestão da organização na tomada de decisão ou na análise de outras medidas de desempenho ou de modelos alternativos.

A Tabela 6.1 contém os ganhos, para 95% de confiança, na implementação do modelo A para os cenários pessimista, moderado e otimista em relação as medidas de desempenho i) tempo médio de valor não acrescentado de uma viatura em horas, ii) tempo médio de espera de uma viatura em horas, iii) tempo médio de permanência de uma viatura na oficina em horas e iv) número médio de viaturas reparadas mensalmente. Note-se que valores negativos significam um aumento da medida de desempenho no modelo A em relação ao modelo atual e, da mesma forma, valores positivos significam uma redução da medida de desempenho no modelo A em relação ao modelo atual.

Tabela 6.1 – Ganhos nas medidas de desempenho que resultam da implementação do modelo A.

Medida de desempenho	Cenário		
	Pessimista	Moderado	Otimista
Tempo de valor não acrescentado (horas)	0,46	0,53	0,59
Tempo de espera (horas)	-0,24	2,98	6,20
Tempo de permanência na oficina (horas)	0,26	3,60	6,94
Número de viaturas reparadas mensalmente	5	-1	-7

Assim, tal como é possível observar na Tabela 6.1, a implementação do modelo A implica, segundo um cenário pessimista, uma redução de 0,46 horas no tempo médio de valor não acrescentado de uma viatura e uma redução de 0,26 horas no tempo médio de permanência de uma viatura na oficina, para um nível de 95% de confiança. Dado o aumento da eficácia e da eficiência no modelo A em relação ao modelo atual, considera-se que os cenários pessimistas em relação ao tempo médio de espera de uma viatura e ao número médio de viaturas reparadas mensalmente são irrealistas.

A implementação do modelo A implica, segundo um cenário moderado, uma redução de 0,53 horas no tempo médio de valor não acrescentado de uma viatura, uma redução de 2,98 horas no tempo médio de espera de uma viatura, uma redução de 3,60 horas no tempo médio de permanência de uma viatura na oficina e um aumento de 1 viatura no número médio de viaturas reparadas mensalmente, para um nível de 95% de confiança.

Por fim, num cenário otimista, a implementação do modelo A implica uma redução de 0,59 horas no tempo médio de valor não acrescentado de uma viatura, uma redução de 6,20 horas no tempo médio

de espera de uma viatura, uma redução de 6,94 horas no tempo médio de permanência de uma viatura na oficina e um aumento de 7 viaturas no número médio de viaturas reparadas mensalmente, para um nível de 95% de confiança.

Portanto, o modelo A é mais eficaz e eficiente do que o modelo atual, pelo que, a oficina irá beneficiar na sua implementação, já que contribuirá para uma redução do número de atrasos na reparação das viaturas e, conseqüentemente, poderá reduzir os custos associados à cedência de viaturas de cortesia. Assim, é de esperar uma melhoria na imagem da oficina perante os clientes e também uma melhor relação com estes, potenciando a sua durabilidade. Logo, segundo o pensamento *lean*, a implementação do modelo A possibilita um aumento no valor do serviço prestado ao cliente através da redução e eliminação de atividades de valor não acrescentado.

A Tabela 6.2 contém os ganhos, para 95% de confiança, na implementação do modelo B para os cenários pessimista, moderado e otimista em relação as medidas de desempenho i) número médio de viaturas na fila de espera para a fase de Desmontagem, ii) tempo médio de uma viatura na fila de espera em horas para a fase de Desmontagem, iii) número médio de viaturas na fila de espera para a fase de Montagem, iv) tempo médio de uma viatura na fila de espera em horas para a fase de Montagem, v) número médio de viaturas reparadas mensalmente e vi) tempo médio de permanência em horas de uma viatura na oficina.

Tabela 6.2 – Ganhos nas medidas de desempenho que resultam da implementação do modelo B.

Medida de desempenho	Cenário		
	Pessimista	Moderado	Otimista
Número de viaturas na fila de espera para a fase de Desmontagem	1	3	4
Tempo na fila de espera para a fase de Desmontagem (horas)	2,33	4,69	7,04
Número de viaturas na fila de espera para a fase de Montagem	2	4	6
Tempo na fila de espera para a fase de Montagem (horas)	2,18	4,63	7,08
Número de viaturas reparadas mensalmente	1	7	13
Tempo de espera (horas)	2,93	5,86	8,79
Tempo de permanência na oficina (horas)	2,62	5,65	8,68

Tal como é possível constatar na Tabela 6.2, a implementação do modelo B implica, segundo um cenário pessimista, uma redução de 1 viatura no número médio de viaturas na fila de espera para a fase de Desmontagem, uma redução de 2,33 horas no tempo médio de uma viatura na fila de espera para a fase de Desmontagem, uma redução de 2 viaturas no número médio de viaturas na fila de espera

para a fase de Montagem, uma redução de 2,18 horas no tempo médio de uma viatura na fila de espera para a fase de Montagem, um aumento de 1 viatura no número médio de viaturas reparadas mensalmente, uma redução de 2,93 horas no tempo médio de espera de uma viatura e uma redução de 2,62 horas no tempo médio de permanência de uma viatura na oficina, para um nível de 95% de confiança.

A implementação do modelo B implica, segundo um cenário moderado, uma redução de 3 viaturas no número médio de viaturas na fila de espera para a fase de Desmontagem, uma redução de 4,69 horas no tempo médio de uma viatura na fila de espera para a fase de Desmontagem, uma redução de 4 viaturas no número médio de viaturas na fila de espera para a fase de Montagem, uma redução de 4,63 horas no tempo médio de uma viatura na fila de espera para a fase de Montagem, um aumento de 7 viaturas no número médio de viaturas reparadas mensalmente, uma redução de 5,86 horas no tempo médio de espera de uma viatura e uma redução de 5,65 horas no tempo médio de permanência de uma viatura na oficina, para um nível de 95% de confiança.

Por fim, a implementação do modelo B implica, segundo um cenário otimista, uma redução de 4 viaturas no número médio de viaturas na fila de espera para a fase de Desmontagem, uma redução de 7,04 horas no tempo médio de uma viatura na fila de espera para a fase de Desmontagem, uma redução de 6 viaturas no número médio de viaturas na fila de espera para a fase de Montagem, uma redução de 7,08 horas no tempo médio de uma viatura na fila de espera para a fase de Montagem, um aumento de 13 viaturas no número médio de viaturas reparadas mensalmente, uma redução de 8,79 horas no tempo médio de espera de uma viatura e uma redução de 8,68 horas no tempo médio de permanência de uma viatura na oficina, para um nível de 95% de confiança.

Concluída a análise dos resultados, procede-se com a sugestão de outras propostas de melhoria que também visem a melhoria do desempenho da oficina.

6.2. Outras propostas de melhoria

Sugere-se a implementação das ferramentas PL abordadas na presente dissertação, nomeadamente, o 5S, *Kaizen* e *Spaghetti Diagram* como forma de contribuir para a melhoria do desempenho da oficina.

Como forma de implementar o 5S, a gestão poderia estabelecer que os últimos 10 minutos de cada dia de trabalho fossem dedicados à organização e arrumação dos postos de trabalho por parte dos técnicos, como por exemplo, na arrumação das ferramentas nos locais apropriados por ordem de utilidade, isto é, as que são usadas com maior frequência em locais mais acessíveis e que não envolvam movimentações desnecessárias. Ainda como exemplo, os técnicos poderiam proceder à limpeza dos seus postos de trabalho, já que as atividades que neles ocorrem libertam muitos resíduos. Assim, ao selar pela segurança e bem-estar dos técnicos, a oficina beneficiaria de uma maior motivação por partes destes, traduzindo-se não só num ambiente de trabalho mais harmonioso, como também num potencial aumento do seu desempenho e numa redução na taxa de absentismo. Ao praticar

diariamente estas atividades, promove-se a perpetuação de um espírito de melhoria contínua através da utilização dos 5S (Organização, Arrumação, Limpeza, Padronização e Disciplina).

Tal como para a implementação do 5S, os primeiros 10 minutos de cada dia de trabalho poderiam ser dedicados a eventos *kaizen*. Nestes eventos, poderia ser discutido, por exemplo, o estado de reparação das viaturas, como forma de prever se as operações ainda por executar permitem a entrega da viatura ao cliente no prazo estabelecido. Assim, é inculcido aos técnicos um sentido de responsabilidade e propósito dentro da oficina, o que possibilita a sua motivação, traduzindo-se num aumento do desempenho da oficina. Também como forma de motivar os técnicos e fazer com que se sintam mais valorizados, estes seriam livres de sugerir à gestão da organização oportunidades de melhoria.

Sugere-se a aplicação do *Spaghetti Diagram* como forma de ilustrar o grau de ineficiência das movimentações na oficina, tais como, a procura por ferramentas e componentes e as deslocações associadas ao registo dos tempos de processamento nos computadores da oficina. Assim, é possível atribuir melhores localizações aos recursos, de forma a minimizar o número de movimentações ao longo do processo de reparação de uma viatura.

Por fim, sugere-se a elaboração de relatórios que contenham os valores das medidas de desempenho analisadas na presente dissertação para monitorizar as implementações das sugestões de melhoria.

A aplicação das ferramentas supramencionadas permitirá alinhar a organização e os seus técnicos para um ambiente mais *lean*, potenciando a procura e eliminação de atividades de valor não acrescentado (*muda*), criando um ambiente mais organizado, limpo e padronizado e agilizando as tarefas internas. Estas melhorias contribuirão, gradualmente, para a redução do tempo de permanência de uma viatura na oficina, para o aumento do bem-estar dos técnicos e, conseqüentemente, para a redução de custos globais. No médio a longo prazo, é expectável que o estudo que consta na presente dissertação possa motivar a organização a entrar na “jornada *lean*”, dedicando esforços e recursos na procura constante no aumento da eficácia e eficiência.

6.3. Limitações do estudo e propostas para trabalhos futuros

No desenvolvimento do modelo B, foi possível quantificar apenas os ganhos em termos do número médio de viaturas nas filas de espera, dos tempos médios de uma viatura nas filas de espera para as fases de Desmontagem e Montagem e do tempo médio de permanência de uma viatura na oficina. No entanto, não são conhecidos custos de mão de obra ou margens de lucro da oficina, pelo que se torna impossível quantificar os ganhos em termos financeiros.

O modelo não contempla situações exógenas à oficina que condicionem a sua capacidade, tais como, períodos de férias ou baixas devido a motivos de saúde dos técnicos, falhas de eletricidade, avarias nos equipamentos ou ausência de ferramentas ou tintas necessárias numa reparação.

O modelo não retrata situações nas quais os trabalhos de reparação na viatura são adiantados até que um componente em falta impossibilite a conclusão do trabalho. Esta limitação prende-se com o facto

de não serem conhecidos *lead time* associados ao tempo de chegadas de componentes, pelo que, não foi possível modelar esta situação.

Por fim, o modelo tem como limitação o facto de modelar a fase de Controlo como se o técnico responsável pela respetiva fase se destinasse unicamente ao controlo de qualidade dos trabalhos de pintura. Na verdade, o técnico responsável por esta fase do processo tem outras funções, como reparações de natureza mecânica. Logo, a sua disponibilidade para executar o controlo de qualidade das viaturas era limitada, pelo que, as viaturas aguardavam mais pela fase de Controlo do que o tempo de espera estimado pelo modelo associado a esta fase.

Como sugestões para trabalhos futuros, sugere-se o desenvolvimento de um modelo de simulação para as secções de chapa e pintura, como forma de estudar isoladamente as fases do processo que ocorrem nas respetivas secções.

Poderá também ser desenvolvido um modelo de simulação para modelar os pedidos de reparação dos clientes, permitindo, assim, prever a procura e conhecer com maior detalhe o número de desistências, o número de atrasos que ocorreram na produção e o número de viaturas de cortesia cedidas.

Adicionalmente, sugere-se o desenvolvimento de um modelo de simulação que represente a oficina após a implementação das ferramentas do PL sugeridas, como forma de monitorizar os efeitos que estas alterações teriam nas medidas de desempenho analisadas na presente dissertação.

Com o conhecimento de custos associados à atividade de reparação automóvel, nomeadamente, margens de lucro ou custos de mão de obra, é possível fazer uma análise custo-benefício da implementação do modelo B. Ao conhecer os custos de contratação de um técnico e as margens de lucro médias mensais, poderia ser feita uma análise de forma a averiguar para que valores de tempo de espera ou de permanência no processo compensaria contratar um técnico.

Por último, poderá ser desenvolvido um modelo de simulação que modele o processo abastecimento de componentes na oficina, como forma de prever atrasos de entrega ou custos associados às encomendas. Sugere-se também o desenvolvimento de outros modelos alternativos ou experimentação de outros cenários que não tenham sido abordados.

Referências bibliográficas

- Abdulmalek, F. A., & Rajgopal, J. (2007). Analyzing the benefits of lean manufacturing and value stream mapping via simulation: a process sector case study. *International Journal of Production Economics*, 107(1), 223–236.
- Acharyaa, T. K. (2011). Material handling and process improvement using lean manufacturing principles. *International Journal of Industrial Engineering*, 18(7), 357–368.
- Alexopoulos, C., & Seila, A. F. (1998). Output data analysis. *Handbook of Simulation*, 225–272.
- Alves, A. C., Sousa, R. M., Carvalho, D., Moreira, F., & Lima, R. M. (2011). Benefits of lean management: results from some industrial cases in Portugal. Acedido em 15 dezembro de 2015 em: http://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/18873/1/CLME2011AA_DC_RS_FM_RL.pdf.
- Anvari, A., Ismail, Y., & Hojjati, S. M. H. (2011). A study on total quality management and lean manufacturing: through lean thinking approach. *World Applied Sciences Journal*, 12(9), 1585–1596.
- Balci, O. (1998). Verification, validation, and testing. *Handbook of Simulation*, 335–393.
- Banks, J. (1998). *Handbook of simulation: principles, methodology, advances, applications, and practice*. Canada. John Wiley & Sons.
- Banks, J., Carson II, J., Nelson, B. & Nicol, D. (2014). *Discrete-event system simulation*. (5ª edição). Pearson.
- Biller, B., & Gunes, C. (2010). Introduction to simulation input modeling. *Proceedings of the Winter Simulation Conference* (pp. 49–58). Winter Simulation Conference.
- Bowen, D. E., & Youngdahl, W. E. (1998). “Lean” service: in defense of a production-line approach. *International Journal of Service Industry Management*, 9(3), 207–225.
- Chung, C. A. (2003). *Simulation modeling handbook: a practical approach*. CRC press.
- Doğan, N. Ö., & Unutulmaz, O. (2014). Lean production in healthcare: a simulation-based value stream mapping in the physical therapy and rehabilitation department of a public hospital. *Total Quality Management & Business Excellence*, 5(6), 1–17.
- Domingues, J.P.D. (2013). Aplicação de ferramentas lean e seis sigma numa indústria de sistemas de classificação. Dissertação de mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologias - Universidade Nova de Lisboa, Portugal.
- Fujimoto, T. (2012). The Evolution of Production Systems. *Annals of Business Administrative Science*, 11(0), 25–44.
- Gattuso, D. & Cassone, G. C. (2011). A statistical analysis for micro-simulation of UDC operativity. *Procedia Engineering*, 21(0), 114–124.
- Ghinato, P., 2006. Jidoka: mais do que pilar da qualidade. *Lean Way Consulting*. Acedido em 8 de dezembro de 2015 em: http://media.wix.com/ugd/2eed20_3722740899b36896a9e5cef6f360687f.pdf?dn=jidoka% B1%5D.pdf
- Gopinath, S., & Freiheit, T. I. (2012). A waste relationship model and center point tracking metric for lean manufacturing systems. *IIE Transactions*, 44(2), 136–154.
- Handel, M. J. (2014). Theories of lean management: An empirical evaluation. *Social Science Research*, 44, 86–102.
- Hines, P., Bartolini, M., & Silvi, R. (2002). *Lean profit potential*. Lean Enterprise Research Centre, Cardiff Business School.

- Hines, P., Holweg, M., & Rich, N. (2004). Learning to evolve: a review of contemporary lean thinking. *International Journal of Operations & Production Management*, 24(10), 994–1011.
- Hines, P., Found, P., Griffiths, G., & Harrison, R. (2011). *Staying Lean: thriving, not just surviving*. CRC Press.
- Holweg, M., & Bicheno, J. (2002). Supply chain simulation—a tool for education, enhancement and endeavour. *International Journal of Production Economics*, 78(2), 163–175.
- Holweg, M. (2007). The genealogy of lean production. *Journal of Operations Management*, 25(2), 420–437.
- Hopp, W. J., & Spearman, M. L. (2004). To pull or not to pull: what is the question? *Manufacturing & Service Operations Management*, 6(2), 133–148.
- Jaca, C., Viles, E., Paipa-Galeano, L., Santos, J., & Mateo, R. (2014). Learning 5S principles from Japanese best practitioners: case studies of five manufacturing companies. *International Journal of Production Research*, 52(15), 4574–4586.
- Kang, K., & Roland, R. J. (1998). Military simulation. *Handbook of Simulation: Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice*, 645–658.
- Kelton, W. D., & Law, A. M. (1991). *Simulation modeling and analysis*. (2ª edição). Boston: McGraw Hill.
- Kelton, W. D., Sadowski, R. P., & Sadowski, D. A. (2004). *Simulation with ARENA*. (3ª edição). Nova Iorque: McGraw-Hill, Inc.
- Köse, E., Basar, E., Demirci, E., Günerolgu, A. & Erkebay, S. (2003). Simulation of marine traffic in Istanbul Strait. *Simulation Modelling Practise and Theory*. 11, 597-608.
- Kvam, P. H., & Vidakovic, B. (2007). *Nonparametric statistics with applications to science and engineering* (Vol. 653). John Wiley & Sons. New Jersey.
- Laughery, R., Plott, B., & Scott-Nash, S. (1998). Simulation of service systems. *Handbook of Simulation: Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice*, 629–644.
- Law, A. M. (2009). How to build valid and credible simulation models. *Proceedings of the 40th Conference on Winter Simulation* (pp. 39–47). Winter Simulation Conference.
- Law, A. M., & McComas, M. G. (1999). Simulation of manufacturing systems. In *Proceedings of the 19th conference on Winter simulation* (pp. 56–59). ACM.
- Lian, Y.-H., & Van Landeghem, H. (2002). An application of simulation and value stream mapping in lean manufacturing. *Department of Industrial Management, Ghent University, Technologiepark*, 903.
- Liker Jeffrey, K., & David, M. (2004). The Toyota Way. *Fieldbook, A Practical Guide for Implementing Toyotas 4P's*. Nova Iorque: McGraw-Hill.
- Machado, V. C. (2007). Perspectivas de desenvolvimento da Produção Magra. *VIII Congresso Ibero-americano de Engenharia Mecânica, CIBIM8, Perú-Cusco* (Vol. 23).
- Machado, V. C. (2014). Sebenta de apoio à disciplina Metodologias Lean e Seis Sigma. Faculdade de Ciências e Tecnologias, Universidade Nova de Lisboa.
- Maia, L. C., Alves, A. C., & Leão, C. P. (2011). Metodologias para implementar lean production: uma revisão crítica de literatura. Em 6º Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia (CLME2011) "A Engenharia no combate à pobreza, pelo desenvolvimento e competitividade". Acedido em 19 de dezembro de 2015 em <http://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/18874?mode=full>.
- Manivannan, M. S. (1998). Simulation of logistics and transportation systems. *Handbook of Simulation: Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice*, 571–604.
- McGuire, F. (1998). Simulation in healthcare. *Handbook of Simulation: Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice*, 605–627.

- Mehri, D. (2006). The darker side of lean: an insider's perspective on the realities of the Toyota production system. *The Academy of Management Perspectives*, 20(2), 21–42.
- Melton, T. (2005). The benefits of lean manufacturing: what lean thinking has to offer the process industries. *Chemical Engineering Research and Design*, 83(6), 662–673.
- Pereira, Z. L. & Requeijo, J. G., (2012). *Qualidade: planeamento e controlo estatístico de processos* (2ª edição). Lisboa: FFCT
- Pinto, J. P. (2008). Lean thinking. *Comunidade Lean Thinking*, 1–8. Acedido 30 de Novembro de 2015 em <http://molar.crb.ucp.pt/cursos>.
- Rother, M. (2009). *Toyota Kata: managing people for improvement, adaptiveness and superior results*. McGraw-Hill Professional.
- Rother, M., & Shook, J. (1999). *Learning to see: value stream mapping to add value and eliminate muda*. Lean Enterprise Institute.
- Smith, M. J. (2015). Statistical Analysis Handbook: a comprehensive handbook of statistical concepts, techniques and software tools. Acedido em 20 de fevereiro, 2016 em <http://statsref.com/StatsRefSample.pdf>
- Sprent, P., & Smeeton, N. C. (2007). *Applied nonparametric statistical methods*. CRC Press.
- Sundar, R., Balaji, A. N., & Kumar, R. M. S. (2014). A review on lean manufacturing implementation techniques. *Procedia Engineering*, 97, 1875–1885.
- Vincent, S. (1998). Input data analysis. *Handbook of Simulation: Principles, Advances, Applications, and Practice*, 55–93.
- Wilson, L. (2010). *How to implement lean manufacturing*. Nova Iorque: McGraw-Hill.
- Womack, J. P., & Jones, D. T. (2010). *Lean thinking: banish waste and create wealth in your corporation*. Simon and Schuster.
- Womack, J. P., Jones, D. T., & Roos, D. (1990). *Machine that changed the world*. Nova Iorque: Rawson Associates.

A. Pensamento lean e simulação

A.1. Value Stream Mapping

A Figura A.1 retrata a simbologia utilizada na construção do VSM que deve ser idêntica para todos os intervenientes na cadeia de valor do produto ou serviço.

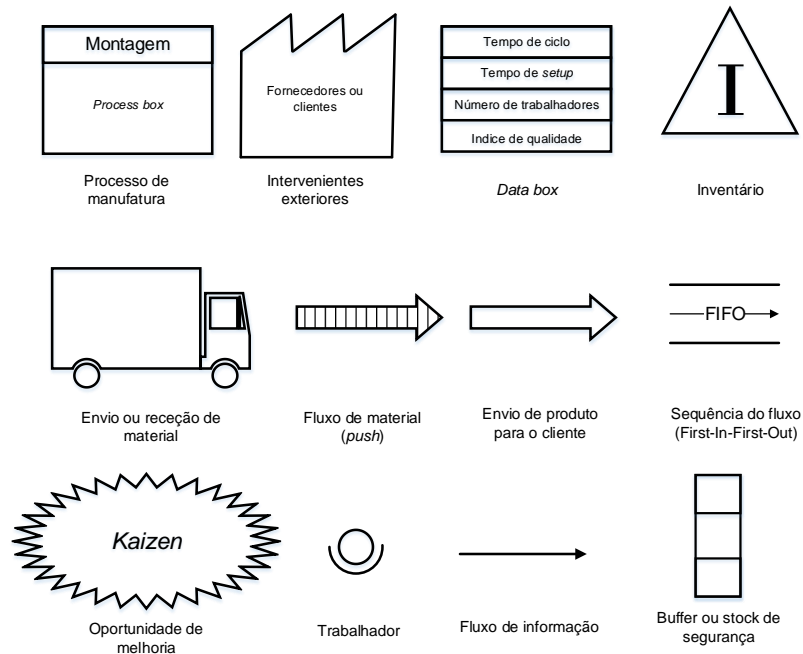


Figura A.1 – Simbologia do VSM.
Adaptado de: Rother e Shook (1999).

Os autores Rother e Shook (1999) sugerem as seguintes etapas na construção do *Current State Map* (CSM):

1. Informações dos clientes: quantidades requeridas por unidade de tempo de cada produto, dimensão do lote de entrega e outras se necessário. A Figura A.2 retrata a etapa 1 na construção do CSM;

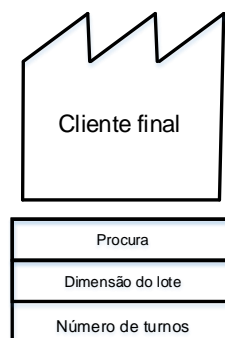


Figura A.2 – Etapa 1 na construção do CSM.
Adaptado de: Rother e Shook (1999).

2. Processos ao longo da cadeia de valor: corresponde a uma área onde ocorre fluxo de material. Um *process box* corresponde apenas a uma fase do processo (montagem, por exemplo),

mesmo que exista mais do que um posto de trabalho a operar em paralelo. Deve conter informações relativas ao tempo de ciclo da operação, tempo de preparação, número de trabalhadores, tempo disponível e outras que se considerem relevantes. A Figura A.3 retrata a etapa 2 na construção do CSM;

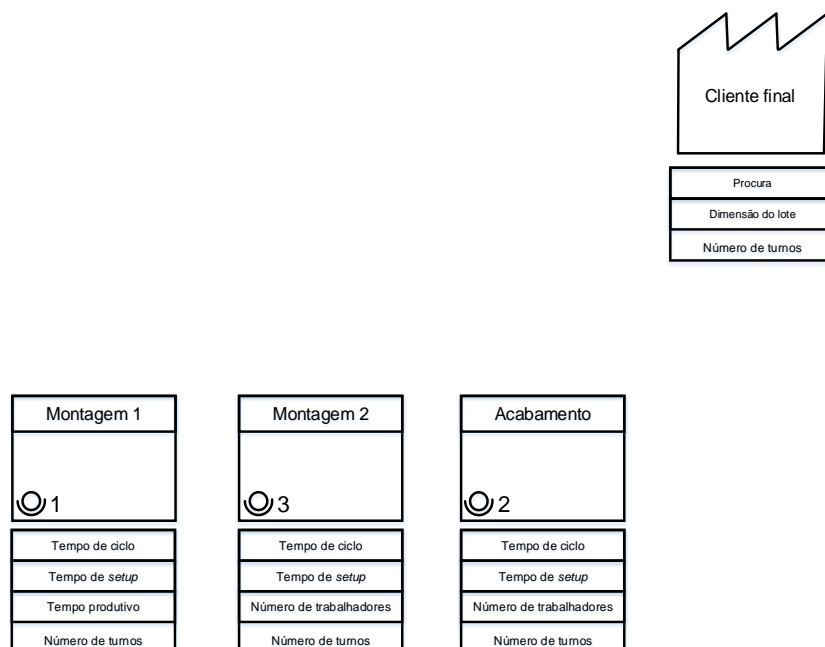


Figura A.3 – Etapa 2 na construção do CSM.
Adaptado de: Rother e Shook (1999).

3. Inventários: corresponde às acumulações de material ao longo da cadeia de valor. São pontos de extrema importância no CSM pois indicam onde há interrupções do fluxo, realçando oportunidades de melhoria. O símbolo deve conter a informação relativa à quantidade de inventário. A Figura A.4 retrata a etapa 3 na construção do CSM;

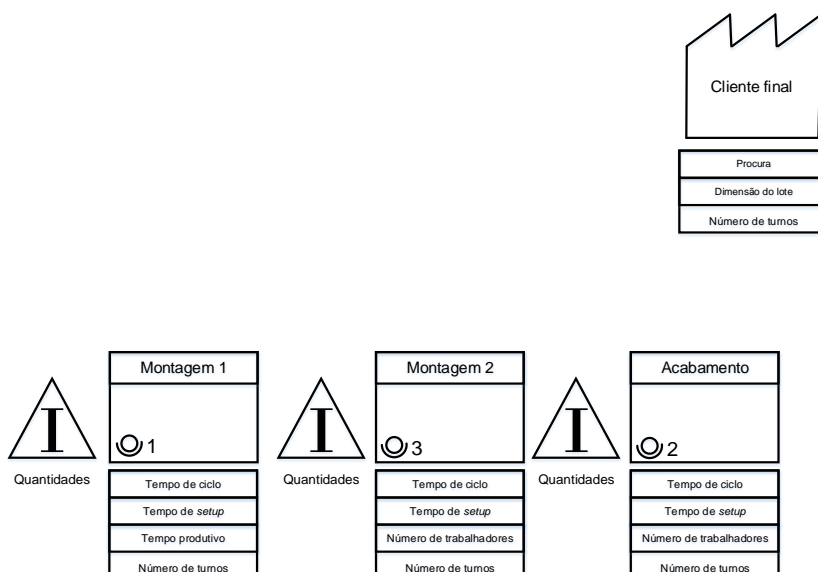


Figura A.4 – Etapa 3 na construção do CSM.
Adaptado de: Rother e Shook (1999).

4. Envio e recepção de materiais: deve conter informações relativas à quantidade e frequência de envio (ou recepção) de material por unidade de tempo. Para evidenciar o transporte de matéria são desenhados um camião e uma seta larga. A simbologia do transporte é idêntica quer para a recepção de matéria-prima, quer para o envio de produto acabado. A Figura A.5 retrata a etapa 4 na construção do CSM;

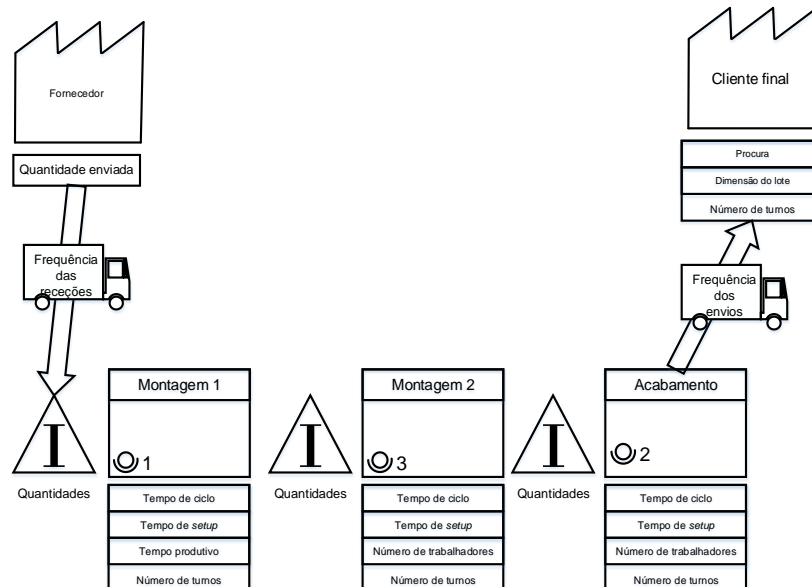


Figura A.5 – Etapa 4 na construção do CSM.
Adaptado de: Rother e Shook (1999).

5. Fluxo de informação e materiais: corresponde ao fluxo de informação (ocorre no sentido inverso do fluxo de materiais) e materiais ao longo da cadeia de valor. Evidencia se se trata de um sistema *push* ou *pull*. A Figura A.6 retrata a etapa 5 na construção do CSM;

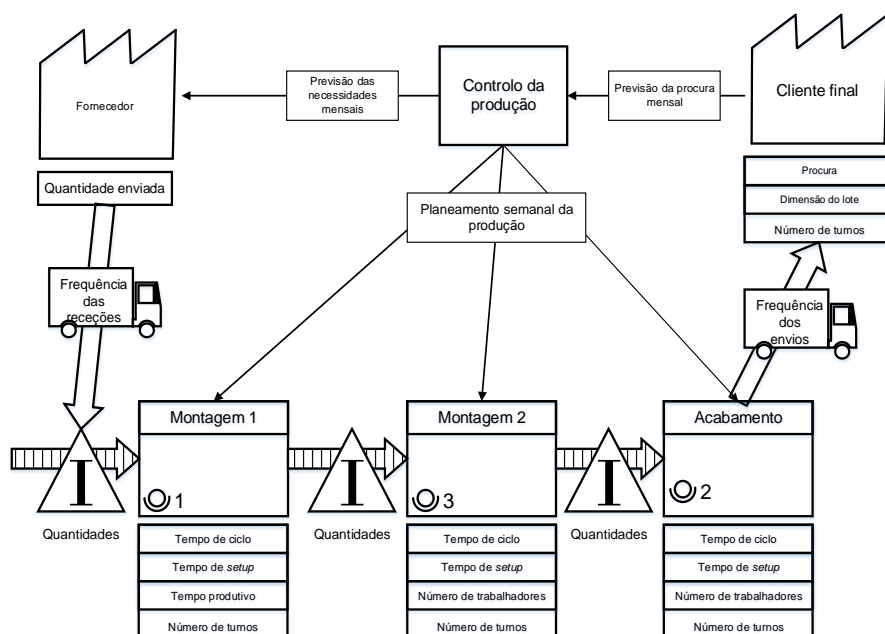


Figura A.6 – Etapa 5 na construção do CSM.
Adaptado de: Rother e Shook (1999).

6. *Timeline*: corresponde ao tempo decorrido desde da receção de matéria-prima ao envio de produto acabado. É representado por baixo dos *process box* e *inventory* onde deve constar o *lead time* de cada elemento. O *lead time* num *process box* corresponde à duração de cada atividade e num *inventory* corresponde ao quociente entre a quantidade de *stock* pela procura dos clientes (por unidade de tempo). Além dos *lead time*, a *timeline* deve também evidenciar o tempo de valor acrescentado (tempo dedicado à execução de atividades que acrescentam valor ao produto). No final da *timeline*, constam a soma dos *lead times* de cada atividade e do tempo de valor acrescentado. A Figura A.7 ilustra o aspeto de um CSM completo.

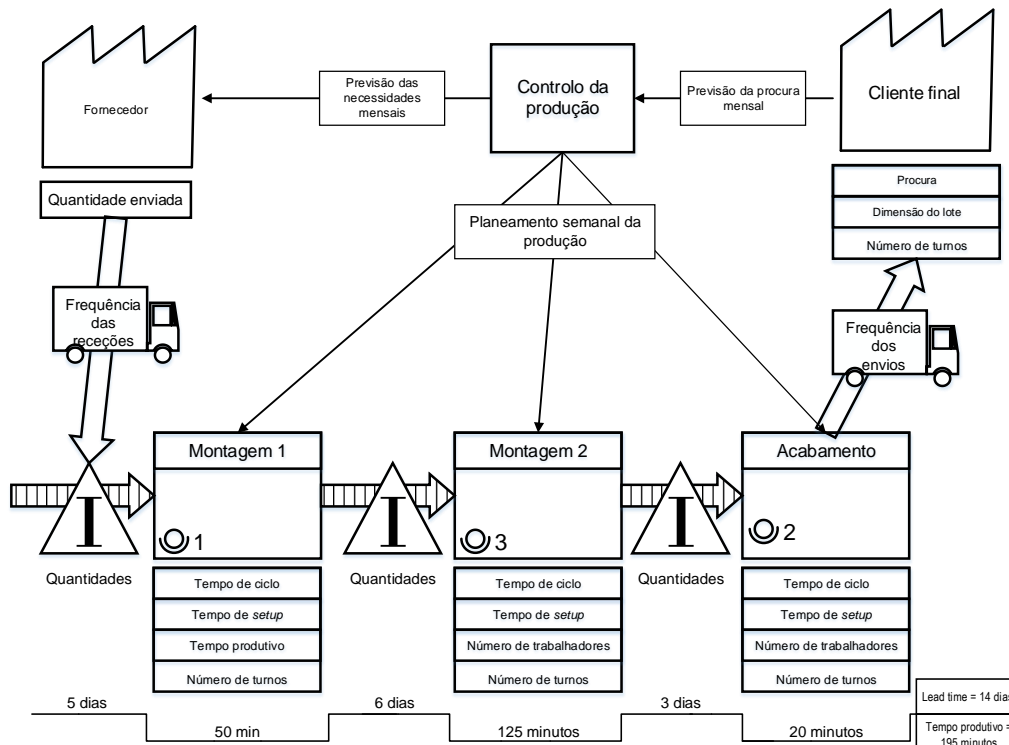


Figura A.7 – Etapa 6 na construção do CSM.
Adaptado de: Rother e Shook (1999).

O rácio de valor acrescentado (fração do lead time do processo que acrescenta valor ao produto) deve ser calculado para cada parte do processo, para evidenciar oportunidades de melhoria no fluxo da cadeia de valor, abrindo caminho para o desenvolvimento do FSM. Deve-se procurar estabelecer um fluxo de materiais e informações baseadas num sistema *pull* através de um ritmo de produção compassado com o *takt time* (Liker e Meier, 2006).

A.2. Diagrama de dispersão

O diagrama de dispersão das observações X_1, X_2, \dots, X_n é um gráfico dos pares (X_i, X_{i+1}) num referencial ortonormado, para $i = 1, 2, \dots, n - 1$. Por questões de simplicidade, considere-se que as observações X_i são não negativas. Se as observações forem independentes, então é de esperar que os vários pontos correspondentes aos pares se dispersem aleatoriamente no primeiro quadrante do plano. Se, pelo contrário, os dados estiverem correlacionados positivamente (negativamente), então,

tendem a expor-se segundo uma reta de declive positivo (negativo) no primeiro quadrante (Law e Kelton, 1991).

De seguida, são ilustrados dois diagramas de dispersão. A Figura A.8 ilustra dados não correlacionados, ou seja, observações independentes, enquanto que a Figura A.9 ilustra dados correlacionados positivamente.

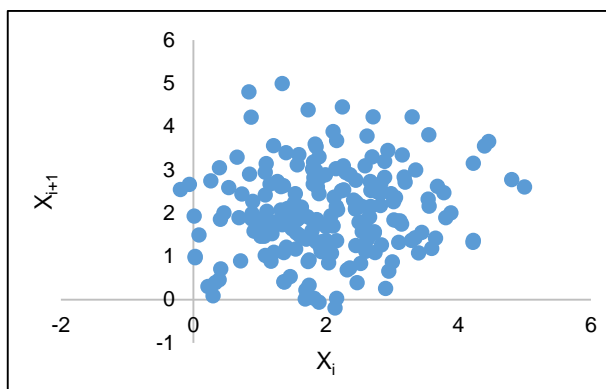


Figura A.8 – Exemplo de um gráfico de dispersão de dados não correlacionados.

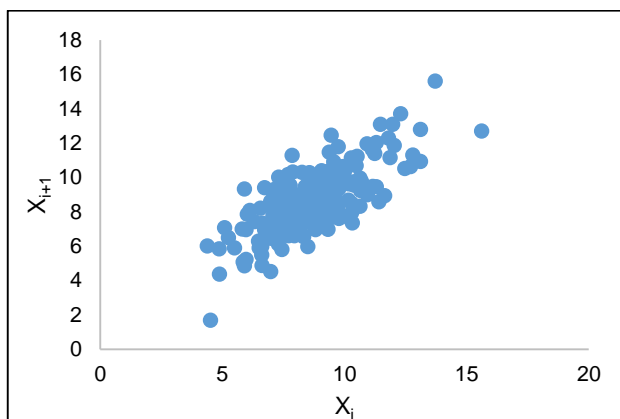


Figura A.9 – Exemplo de um gráfico de dispersão de dados correlacionados positivamente.

A.3. Histograma

Na construção de um histograma, é necessário agrupar os dados em classes de igual amplitude. Em primeiro lugar, deve ser calculado o número de classes. Não existindo uma regra universal para a sua determinação, os autores Pereira e Requeijo (2012) sugerem a aplicação de uma das duas equações:

$$k = \sqrt{N} \quad (\text{A.1})$$

Ou

$$k = 1 + 3,322 * \log(N) \quad (\text{A.2})$$

Em que k é o número de classes e N é o número de total de observações.

Determinado o número de classes, procede-se com a determinação da amplitude de cada. Assim, a amplitude (R) de uma classe é definida como:

$$R = \frac{h}{k} \quad (\text{A.3})$$

Em que h corresponde à amplitude total dos dados observados, calculada pela diferença entre os valores máximo e mínimo:

$$h = X_{max} - X_{min} \quad (\text{A.4})$$

Determinados o número de classes e a amplitude de cada, procede-se ao cálculo das frequências absolutas ou relativas. A frequência absoluta (f_a) corresponde ao número de observações que pertence a uma dada classe. A frequência relativa (f_r) representa a proporção do número de observações que pertence a uma dada classe na dimensão da amostra. Assim, a frequência relativa é definida matematicamente por:

$$f_r = \frac{f_a}{N} \quad (\text{B.5})$$

Assim, estão reunidas as condições necessárias para a construção do histograma. Para evidenciar a importância que tem a definição do número de classes, são ilustrados dois histogramas correspondentes ao mesmo conjunto de dados, diferindo apenas no número de classes. Na Figura A.10 o conjunto dos dados foi repartido em 14 classes, enquanto que na Figura A.11 o mesmo conjunto de dados foi repartido em 8 classes:

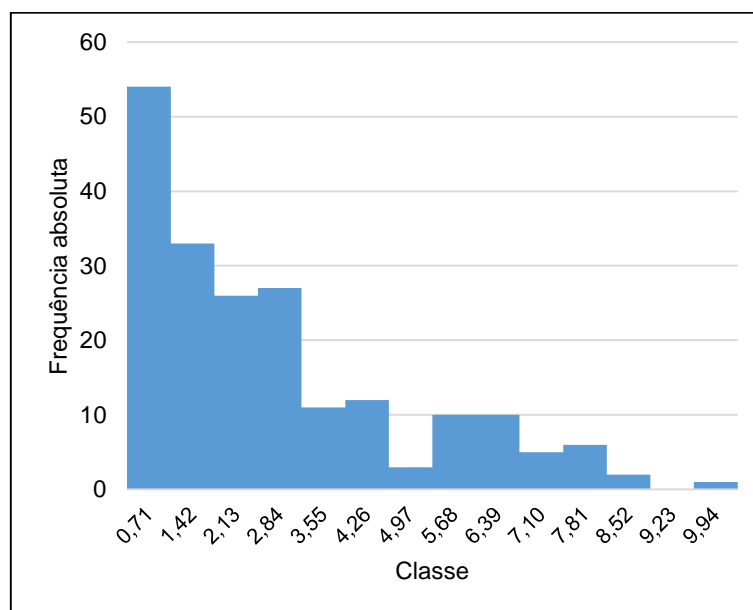


Figura A.10 – Exemplo de um histograma de 14 classes.

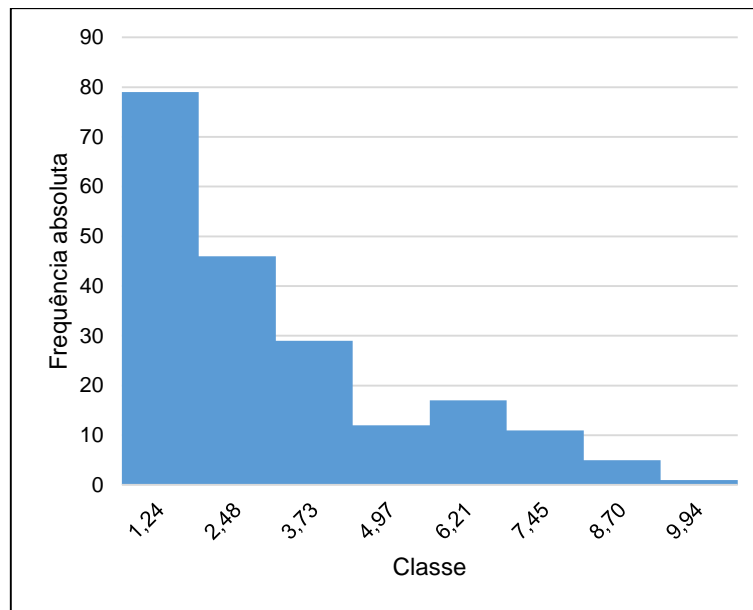


Figura A.11 – Exemplo de um histograma de 8 classes.

A.4. Divisão do conjunto de dados

A divisão do conjunto de dados é por tentativa erro pois, uma vez que a construção do histograma depende do número de classes e da respetiva amplitude, poderá não ser imediato (nem trivial) detetar irregularidades que evidenciem que o conjunto dos dados provenha de populações diferentes.

Considere-se um histograma de um conjunto de dados de uma amostra X de dimensão n no qual foi possível detetar dois subconjuntos $\{X_i \subseteq X: X = \bigcup_{i=1}^2 X_i\}$ de dimensões n_1 e n_2 . Assumindo que estes pertencem a populações distintas, devem então ser estudados como dois conjuntos mutuamente exclusivos ($x \in (X_1 \cap X_2) = \emptyset \Rightarrow P(x \in (X_1 \cap X_2)) = 0$). Logo, a probabilidade de um valor x pertencer ao subconjunto X_i corresponde à proporção da dimensão do subconjunto no total das observações, ou seja, $P(x \in X_i) = \frac{n_i}{n}$ para $i = 1, 2$.

A.5. Distribuições de probabilidade

Para uma dada família de distribuições de probabilidade, existem formas de parametrizar a função densidade de probabilidade. Estes parâmetros podem ser classificados em (Law e Kelton, 1991):

- Parâmetro de localização (γ): especifica um ponto na abcissa (no eixo dos xx) do conjunto de valores admissíveis de uma distribuição. Tipicamente, representa o ponto central (isto é, a média ou mediana) de distribuições ilimitadas (Vincent, 1998). Alterações do valor de γ traduzem-se em translações da curva de distribuição para a esquerda ou para a direita do referencial;
- Parâmetro de escala (β): determina a unidade de medida (escala) dos valores que uma distribuição pode tomar. Uma alteração no valor de β implica uma contração ou expansão da curva da distribuição de probabilidade no referencial;

- Parâmetro de forma (α): determina o perfil de uma distribuição pertencente a uma dada família de distribuições. Uma alteração no valor de α implica a alteração das propriedades gerais da distribuição (como, por exemplo, o seu achatamento). Nem todas as distribuições possuem este parâmetro (como é o caso da distribuição exponencial e normal).

A Tabela A.1 contém algumas informações relativas aos parâmetros, características e aplicações das distribuições de probabilidade mais utilizadas para a modelação do *input*.

Tabela A.1 – Distribuições de probabilidade teóricas contínuas
(fontes: Law e Kelton (1991); Kelton *et al.*, (2004))

Distribuição	Parâmetros	Caraterísticas	Aplicabilidade
Uniforme	$U \sim (a, b)$, $a, b \in \mathbb{R}$ Valor mínimo (a) e valor máximo (b), com $a < b$.	Todos os valores têm igual probabilidade de ocorrer. Limitada à esquerda e à direita.	Utilizada para modelar um processo do qual pouco se conhece. São estimados os valores mínimo e máximo.
Exponencial	$Exp \sim (\lambda)$, $\lambda \in \mathbb{R}$ Média (λ), com $\lambda > 0$	Variância elevada Limitada à esquerda Ilimitada à direita	Utilizada para modelar o intervalo de tempo entre chegadas consecutivas.
Gamma	$\gamma \sim (\alpha, \beta)$, $\alpha, \beta \in \mathbb{R}$ Parâmetro de forma $\alpha > 0$ Parâmetro de escala $\beta > 0$	Limitada à esquerda Ilimitada à direita	Utilizada para modelar o tempo para executar uma tarefa (atendimento de um cliente ou uma reparação de um equipamento).
Weibull	$Weib \sim (\alpha, \beta)$, $\alpha, \beta \in \mathbb{R}$ Parâmetro de forma $\alpha > 0$ Parâmetro de escala $\beta > 0$.	Limitada à esquerda Ilimitada à direita	Utilizada para modelar o tempo para executar uma tarefa (atendimento de um cliente ou uma reparação de um equipamento) ou para representar a fiabilidade de um equipamento
Normal	$N \sim (\mu, \sigma)$, $\mu, \sigma \in \mathbb{R}$ Média μ Desvio padrão σ	Simétrica. Ilimitada à esquerda e à direita.	Utilizada para modelar processos que aparentam ter uma distribuição simétrica, ou seja, quando a probabilidade de ocorrência de valores acima e abaixo da média é igual. Utilizada para modelar erros de vários tipos ou quantidades que resultam da soma de um grande número de quantidades.

Lognormal	$LogN \sim (\mu_l, \sigma_l), \mu_l, \sigma_l > 0$ Note-se que se $X \sim LogN(\mu_l, \sigma_l)$, então, $\ln X \sim N(\mu, \sigma)$	Limitada à esquerda. Ilimitada à direita.	Utilizada para modelar o tempo para executar uma tarefa ou para quantidades que resultam do produto de um número elevado de outras quantidades.
Triangular	$Tri \sim (a, m, b)$ Valor mínimo (a), valor médio (m), valor máximo (b)	Limitada à esquerda e à direita Simétrica ou não.	Utilizada para modelar processos dos quais pouco se conhece, apenas o valor mais frequente, o mínimo e o máximo.
<i>Poisson</i>	$P \sim (\lambda), \lambda \in \mathbb{R}$ Média $\lambda > 0$	Distribuição discreta	Utilizada para modelar o número de eventos que ocorrem à mesma taxa num dado intervalo de tempo

A.6. Processo de *Poisson*

Segundo Law e Kelton (1991) um processo estocástico $\{N(t), t \geq 0\}$ é considerado um processo de *Poisson* se cumprir as três seguintes condições:

1. As entidades chegam uma de cada vez;
2. O número de chegadas no instante t é independente do número de chegadas no instante $t + s$;
3. A distribuição de $N(t + s) - N(t)$ é independente $\forall t, s \geq 0$

Dadas as características do processo de *Poisson*, enuncie-se os seguintes teoremas:

Teorema 1: se $\{N(t), t \geq 0\}$ é um processo de *Poisson*, então o número de chegadas em qualquer intervalo de tempo de comprimento s é uma variável aleatória que segue uma distribuição de *Poisson* de parâmetro λs (com $\lambda \in \mathbb{R}^+$), ou seja:

$$P[N(t + s) - N(t) = k] = \frac{e^{-\lambda s} (\lambda s)^k}{k!} \quad (\text{A.6})$$

Pelo que, $E[N(s)] = \lambda s$ e, em particular, $E[N(1)] = \lambda$. Logo, λ é o valor esperado do número de chegadas em qualquer intervalo de dimensão 1 (unidades de tempo), ou seja, a taxa de chegadas. Importa referir este teorema para enunciar outro, que irá permitir a modelação da chegada de entidades ao sistema:

Teorema 2: se $\{N(t), t \geq 0\}$ é um processo de *Poisson* de taxa λ , então, os intervalos de tempo correspondentes X_1, X_2, \dots seguem uma distribuição exponencial de média $\frac{1}{\lambda}$.

Assim, para modelar o processo de chegadas, basta conhecer o número de entidades que chega ao sistema por unidade de tempo (taxa de chegadas, λ) e, assumido que chegam em intervalos de tempo

semelhantes, é possível afirmar que o intervalo de tempo entre duas chegadas consecutivas segue uma distribuição exponencial de valor médio $\frac{1}{\lambda}$.

A.7. Ausência de dados

Assuma-se que X representa uma variável aleatória contínua que descreve, por exemplo, o tempo necessário para completar uma atividade. O primeiro passo será definir um intervalo $[a, b]$ (em que a e b representam números reais, com $a < b$) tal que $P(a < X < b) \approx 1$ (leia-se, de forma que seja certo que a variável X esteja compreendida entre os valores de a e b). A estimação de a e b deve ser feita por alguém que seja conhecedor do processo em estudo e que tenha conhecimento empírico para estimar estes valores, sendo que a representa o cenário otimista e b o pessimista (Law, 2009). Estimados a e b , poderá então assumir-se que a variável $X \sim U[a, b]$ (segue uma distribuição uniforme de parâmetros a e b , com $a < b$).

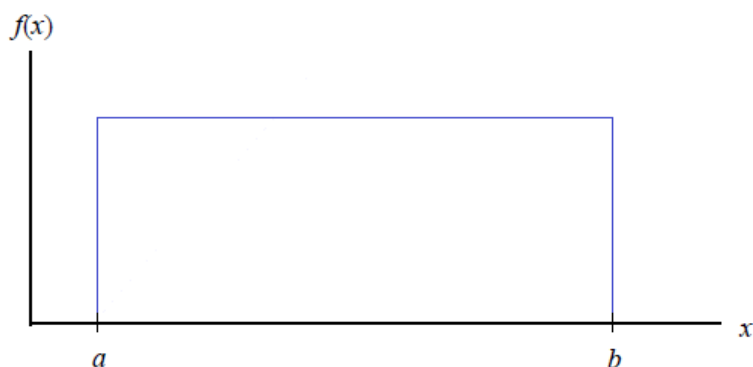


Figura A.12 – Distribuição uniforme
Adaptado de: Law (2009).

No entanto, a distribuição uniforme não acrescenta qualquer informação acerca da probabilidade de dois valores diferentes, isto é, $\forall_{x_1 \neq x_2}, P(x_1 < c) = P(x_2 < c), a \leq c \leq b$ (a probabilidade é a mesma para qualquer valor x compreendido no intervalo $[a, b]$). Logo, esta abordagem aplica-se em situações na qual se sabe muito pouco sobre o processo (Vincent, 1998). No entanto, para representar melhor a realidade, poderá solicitar-se uma outra estimativa ao conhecedor do processo: o valor mais frequente, ou seja, o seu valor médio, m . Deste modo, dados a , b e m , então define-se que $X \sim Tri(a, m, b)$ (leia-se, a variável X segue uma distribuição triangular de valor mínimo a , média m e valor máximo b) (Law, 2009).

O único problema nesta abordagem é a estimação dos parâmetros a , b e m . De facto, são estimações sem qualquer rigor matemático e com base na opinião de alguém, pelo que, estão sujeitas a um carácter de subjetividade. Assim, como forma de “contornar” o carácter subjetivo destas estimações, Law e Kelton (1991) sugerem um acréscimo de 5% em relação ao valor máximo, b .

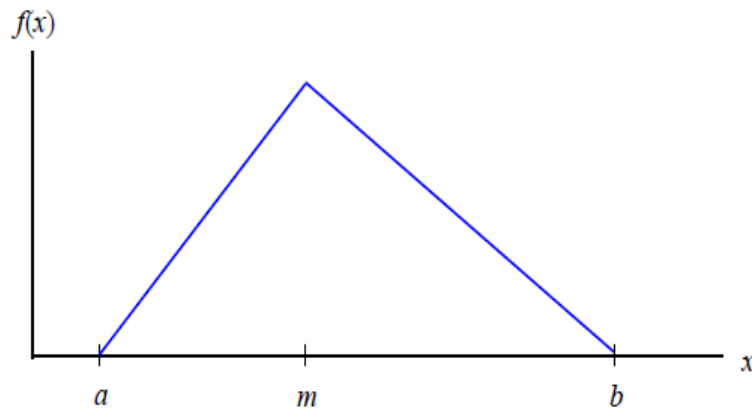


Figura A.13 – Distribuição triangular
Adaptado de Law (2009).

A.8. *Input Analyzer*

Esta ferramenta tem a capacidade de (Chung, 2004):

- Determinar a qualidade do ajuste dos dados a uma distribuição de probabilidade teórica e estimação dos seus parâmetros (Kelton *et al.*, 2004);
- Ajustar os dados até 15 distribuições (embora só algumas estejam disponíveis na versão estudante);
- Calcular o valor do erro quadrático do ajustamento entre os dados e a distribuição de probabilidade teórica, tal como, os valores da estatística teste do QQ e do K-S;
- Cria histogramas de qualidade para representar os dados (com a respetiva curva de ajustamento).

A utilização do *Input Analyzer* compreende, essencialmente, quatro passos (Kelton *et al.*, 2004):

1. Criar um ficheiro de texto (*text file*) que contem os dados recolhidos (servirá de *input* do *Input Analyzer*);
2. Ajustar a uma (ou mais) distribuições de probabilidade. Após inserir os dados, o *Input Analyzer* cria automaticamente um histograma dos dados e faz o ajustamento, mediante uma distribuição à escolha ou mediante aquela que tiver o menor erro quadrático médio (opção *Fit All*);
3. Selecionar a distribuição mais adequada: o *Input Analyzer* fornece três valores que medem a qualidade do ajuste dos dados à distribuição de probabilidade:
 - a. Erro quadrático médio: corresponde à média do quadrado da diferença entre as frequências relativas das observações de uma classe e a frequência relativa dos valores contidos nessa classe da distribuição de probabilidade ajustada. Para maiores valores do erro quadrático médio, pior é a qualidade do ajustamento;

- b. *Corresponding p-value* do QQ: a decisão de rejeitar ou não a hipótese nula é feita com base no *Corresponding p-value*. O *Input Analyzer* fornece o *p-value* para o teste do QQ (e do K-S) e se este for menor que o nível de significância (por definição, o *Input Analyzer* considera 0,05), então deve ser rejeitada a hipótese do ajustamento;
- c. *Corresponding p-value* do K-S: a análise deste teste é em todo idêntica à do QQ. Contudo, vale a pena referir que um elevado *p-value* não constitui uma prova de um bom ajustamento, apenas revela que existe carência de evidências estatísticas que provem o contrário.

4. Copiar a expressão obtida e colá-la no ARENA no modelo apropriado para o efeito.

A Figura A.14 retrata um exemplo do ajustamento de uma curva de uma distribuição de probabilidade teórica ao histograma dos dados utilizando o *Input Analyzer*.

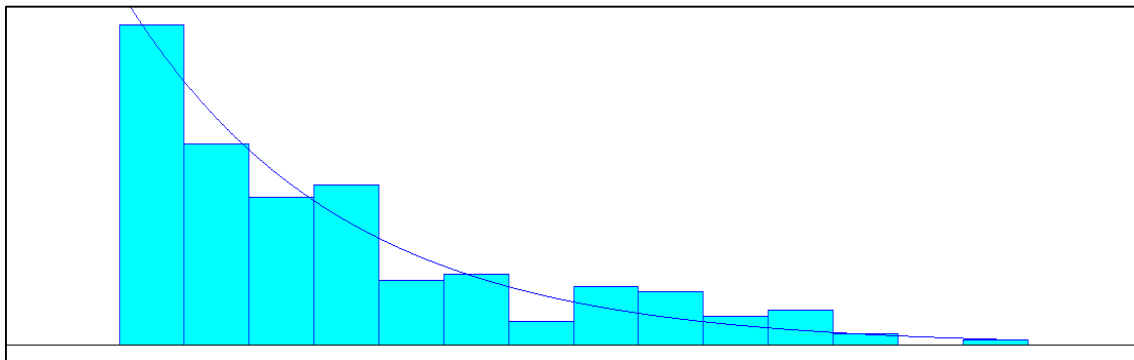


Figura A.14 – Ajustamento de uma distribuição de probabilidade teórica a um histograma.

É gerado automaticamente um relatório com informações como a expressão analítica da distribuição de probabilidade e os *p-value* dos testes do QQ e do K-S, como é possível constatar pela Figura A.15.

Distribution Summary	
Distribution:	Exponential
Expression:	-0.001 + EXPO(2.38)
Square Error:	0.004032
Chi Square Test	
Number of intervals	= 8
Degrees of freedom	= 6
Test Statistic	= 16.2
Corresponding p-value	= 0.014
Kolmogorov-Smirnov Test	
Test Statistic	= 0.0988
Corresponding p-value	= 0.0394
Data Summary	
Number of Data Points	= 200
Min Data Value	= 0
Max Data Value	= 9.94
Sample Mean	= 2.38
Sample Std Dev	= 2.22
Histogram Summary	
Histogram Range	= -0.001 to 10
Number of Intervals	= 14

Figura A.15 – Sumário estatístico do ajustamento dos dados a uma distribuição de probabilidade teórica.

Pela opção *Fit All*, o *software* escolhe automaticamente a distribuição de probabilidade com menor erro quadrático médio em relação aos dados (Figura A.18). Em caso de empate, o *software* seleciona a distribuição com menor número de parâmetros.

Function	Sq Error
-----	-----
Erlang	0.00403
Exponential	0.00403
Beta	0.00554
Gamma	0.0119
Weibull	0.0167
Triangular	0.0371
Lognormal	0.0477
Normal	0.0479
Uniform	0.0774

Figura A.16 – Sumário dos erros quadráticos médios dos dados em relação às distribuições de probabilidade.

Conforme se pode observar pela Figura A.15, o *Corresponding p-value* do QQ e do K-S são inferiores ao nível de significância (5%), pelo que é rejeitada a hipótese de os dados serem provenientes de uma distribuição exponencial de expressão $0,001 + \text{EXPO}(2,38)$. Neste caso, assumindo que nenhuma distribuição teórica se adequaria aos dados com base nos *Corresponding p-value* do QQ e do K-S, os dados devem ser modelados segundo uma distribuição empírica. O *Input Analyzer* é também capaz de criar o gráfico e de determinar a expressão da distribuição empírica, através do menu *Fit*, opção *Empirical*. As Figuras A.17 e A.18 demonstram essa situação.

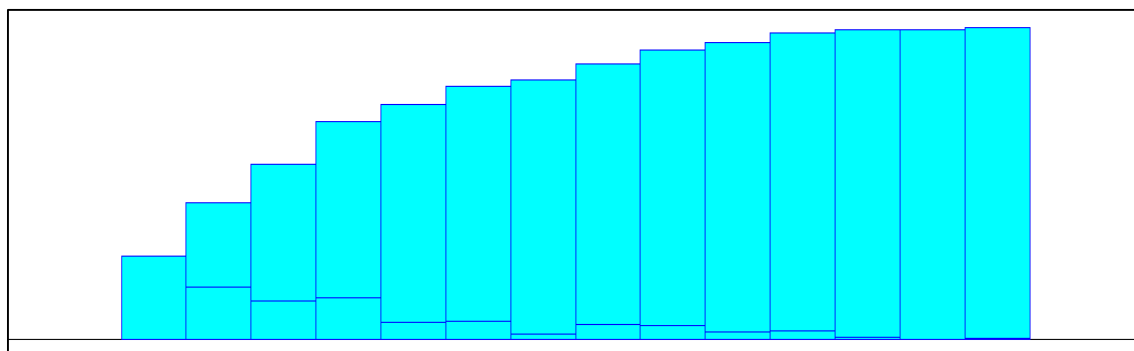


Figura A.17 – Gráfico de uma distribuição empírica.

Distribution Summary	
Distribution:	Empirical
Expression:	CONT or DISC (0.000, -0.001,
	0.270, 0.713,
	0.440, 1.428,
	0.565, 2.142,
	0.700, 2.856,
	0.755, 3.571,
	0.815, 4.285,
	0.835, 4.999,
	0.885, 5.714,
	0.930, 6.428,
	0.955, 7.143,
	0.985, 7.857,
	0.995, 8.571,
	0.995, 9.286,
	0.995, 10.000)
Data Summary	
Number of Data Points	= 200
Min Data Value	= 0
Max Data Value	= 9.94
Sample Mean	= 2.38
Sample Std Dev	= 2.22
Histogram Summary	
Histogram Range	= -0.001 to 10
Number of Intervals	= 14

Figura A.18 – Expressão de uma distribuição empírica.

O *Input Analyzer* apenas sugere qual (ou quais) as distribuições de probabilidade que melhor se ajustam a um dado conjunto de dados. Contudo, cabe ao responsável pela modelação do *input* seleccionar a melhor distribuição. Assim sendo, Kelton *et al.* (2004) sugerem os seguintes cuidados a ter na escolha de uma distribuição:

- Limitada ou ilimitada: em função do que se pretende representar, um tempo de montagem por exemplo, deve-se, então, optar por distribuição limitada (pelo menos, à esquerda). Esta decisão prende-se com o facto de uma distribuição de probabilidade ilimitada admitir qualquer valor real, existindo, portanto, a possibilidade de gerar um número negativo (por muito remota que seja) que não tem qualquer significado físico (um exemplo típico será a escolha entre uma distribuição normal ou triangular);
- Número de parâmetros: é mais fácil alterar certos parâmetros de algumas distribuições (distribuição exponencial) do que outras com maior número de parâmetros (weibull ou a gamma) e cujo o significado não é tão intuitivo. Assim, para fazer uma análise de sensibilidade ao modelo (que consiste em alterar os parâmetros das distribuições e verificar o efeito que essa alteração tem nos *outputs* do modelo) ou testá-lo em diferentes cenários, é preferível manipular parâmetros de uma distribuição que tenham um significado mais óbvio e que, de preferência, sejam menores em número.

A.9. Output Analyzer

Para determinar o intervalo da diferença de duas médias para $(1 - \alpha)\%$ de confiança é necessário criar uma entrada no módulo *statistics (Advanced Process)*, especificar o tipo do ficheiro (*output*) que significa que os valores serão calculados no fim de cada replicação e a sua localização cujo nome deve ser seguido da extensão “.dat”.

Depois de recolhidas as estatísticas das medidas de desempenho (quer do modelo atual, quer do modelo alternativo), recorre-se à aplicação do *software* ARENA *Output Analyzer* (funciona separadamente do *software* ARENA) e selecionar a opção *Analyze > Compare Means*. A análise do intervalo de confiança é em todo idêntica à mencionada no subcapítulo 2.3.7., ou seja, o número 0 deve estar contido no intervalo de confiança (Kelton *et al.*, 2004).

O *Output Analyzer* utiliza testes paramétricos para a estimação do intervalo de confiança em torno da diferença de duas médias, para um nível de confiança $(1 - \alpha)\%$, nomeadamente, o *Paired-t Test* e o *Two-Sample-t Test* tal como é possível observar na Figura A.19:

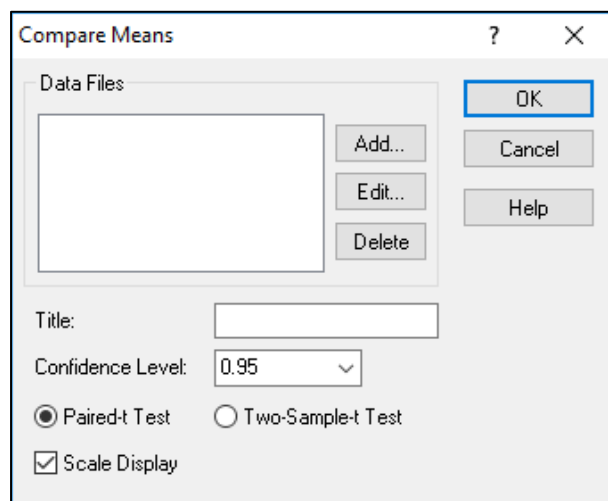


Figura A.19 – Opção *Compare Means* do *Output Analyzer*.

A Figura A.20 ilustra um exemplo da comparação de duas médias através do *Output Analyzer* por meio do intervalo de confiança para um nível de confiança $1 - \alpha = 95\%$. Note-se que ao selecionar os dois ficheiros de extensão “.dat” deve ser escolhida a opção *Lumped* de forma a que as replicações sejam aglomeradas para a análise do intervalo de confiança (Kelton *et al.*, 2004).

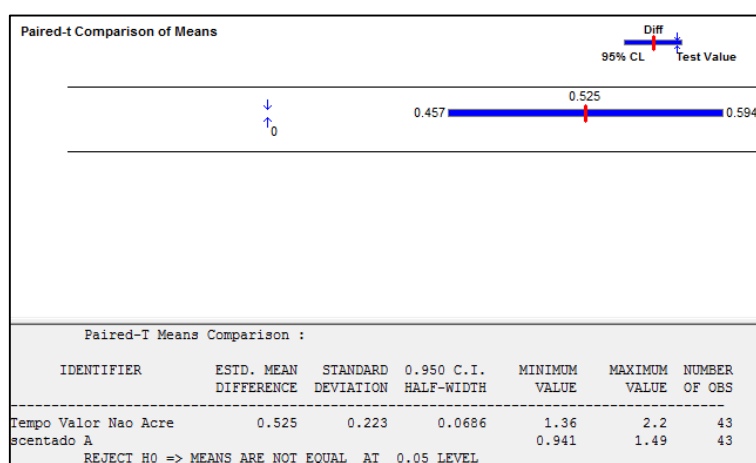


Figura A.20 – Exemplo de comparação de médias através do *Output Analyzer*.

Como é possível observar, o próprio *software* determina a decisão de rejeitar ou não a hipótese de as duas médias serem significativamente diferentes pelo critério do número 0 (zero) estar contido ou não no intervalo de confiança.

Para a determinação o período de *warm-up*, deve-se correr a simulação para um longo período de tempo, escolher uma medida de desempenho do tipo *Time-Persistent* (isto é, uma variável que varia ao longo do tempo) e observar a sua evolução temporal. Se o período de *warm-up* não corresponder a uma “grande percentagem” da corrida de simulação, ficam determinados estes dois parâmetros (Kelton et al., 2004). A Figura A.21 mostra a evolução temporal de uma medida de desempenho (WIP) de um modelo de simulação para dez replicações.

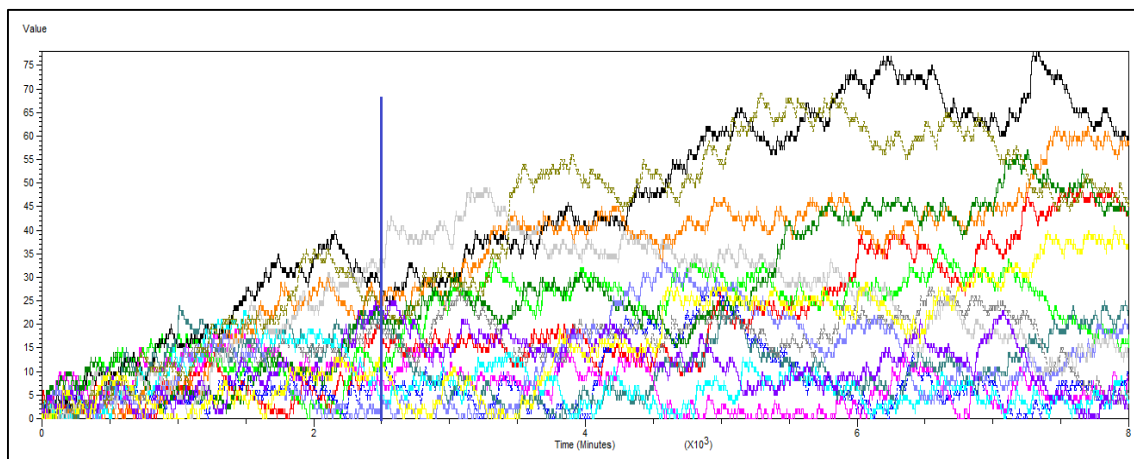


Figura A.21 – Exemplo da evolução temporal do WIP para determinar o período de *warm-up*.

Através da observação da Figura A.21, o WIP parece estabilizar ao fim de 2.500 minutos. A duração da corrida foi de 8.000 minutos, pelo que, 2.500 minutos representam 31% da duração da corrida de simulação. Logo, este valor (2.500 minutos) parece ser um período de *warm-up* razoável para a duração da simulação.

A.10. Mann-Whitney U Test

Assuma-se duas amostras provenientes de duas populações X e Y de dimensões n_X e n_Y , respetivamente a partir das quais se pretende verificar a hipótese de as medianas das populações X e Y serem estatisticamente semelhantes para um dado nível de significância α .

Os procedimentos para aplicação deste teste são (Chung, 2004):

1. Ordenar o conjunto das duas observações por ordem crescente do valor da observação;
2. Atribuir um *rank* (escala) a cada observação, sendo que, um *rank* de 1 corresponde à observação de valor mínimo e um *rank* de $n = n_X + n_Y$ corresponde à observação de valor máximo, no caso de não existir empates entre observações;
3. Calcular a soma dos *ranks* de cada amostra, dados por W_i , com $i \in \{X, Y\}$, através de:

- i. $W_X = \sum_{i \in X} Rank_i$;

$$\text{ii. } W_Y = \sum_{i \in Y} \text{Rank}_i;$$

4. Calcular os valores U_X e U_Y através de:

$$\text{i. } U_i = W_i - \frac{n_i(n_i+1)}{2}, \text{ com } i \in \{X, Y\};$$

5. Escolher $U = \min_{i \in \{X, Y\}} (U_i);$

6. Calcular:

$$\text{i. } \bar{n} = \frac{n_X + n_Y}{2};$$

$$\text{ii. } S = \sqrt{\frac{n_X * n_Y * (n_X + n_Y + 1)}{12}};$$

$$\text{iii. } z = \frac{U - \bar{n}}{S}.$$

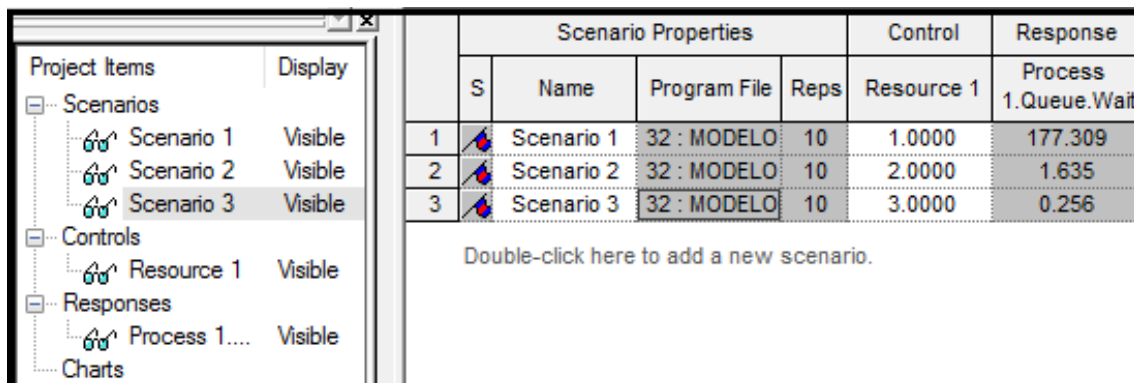
Por fim, o valor z deve ser comparado com o valor $z_{1-\frac{\alpha}{2}}$ e deve ser rejeitada a hipótese nula se:

$$z_{Teste} < |z_{1-\frac{\alpha}{2}}| \Leftrightarrow -z_{1-\frac{\alpha}{2}} < z_{Teste} < z_{1-\frac{\alpha}{2}}.$$

No caso de existir algum empate entre dois *ranks*, deve ser atribuída a ponderação 0,5 aos respectivos *ranks* e prosseguir com a contagem (Sprent e Smeeton, 2007).

A.11. Process Analyzer

A comparação de cenários ou modelos alternativos através do *Process Analyzer* (PAN) é em todo idêntica à realização de um desenho de experiências: são criados cenários (*scenarios*), nos quais são testados diferentes níveis de fatores (*controls*) e são avaliados os efeitos causados pela variação desses fatores (*responses*). A Figura A.22 ilustra um exemplo muito simples no qual se pretende avaliar como o aumento da capacidade de um recurso influencia o tempo o tempo médio na fila de espera.



Scenario Properties				Control	Response
S	Name	Program File	Reps	Resource 1	Process 1.Queue.Wait
1	Scenario 1	32 : MODELO	10	1.0000	177.309
2	Scenario 2	32 : MODELO	10	2.0000	1.635
3	Scenario 3	32 : MODELO	10	3.0000	0.256

Double-click here to add a new scenario.

Figura A.22 – Exemplo do *Process Analyzer*.

Como é possível constatar através da Figura A.22, o *Scenario 1* corresponde ao cenário de base, ou seja, para o recurso de capacidade 1, o tempo médio de espera é de 177,309 minutos para 10 replicações. Para o *Scenario 2* e 3 (cenários alternativos), incrementou-se a capacidade do recurso em

uma unidade e, como é possível observar, o tempo médio de espera diminuiu (bastante) nos cenários alternativos.

B. Desenvolvimento do modelo de simulação

B.1. Chegadas

A Tabela B.1 reúne os parâmetros necessários à construção do histograma para o número diário de entradas de viaturas em oficina.

Tabela B.1 – Parâmetros necessários à construção do histograma para o número de entradas de viaturas em oficina.

Dimensão da amostra	222
Valor máximo (horas)	18
Valor mínimo (horas)	4
Amplitude do histograma (R)	14
Amplitude da classe (h)	1
Número de classes (k)	14

A Tabela B.2 reúne o número de ordem da classe, os limites das classes, as frequências absolutas e relativas do número diário de entradas de viaturas na oficina.

Tabela B.2 – Dados do histograma para o número diário de entradas de viaturas em oficina.

Número da classe	Valores da classe (número de viaturas)	Frequência absoluta	Frequência relativa (%)
1	[4; 5[	8	3,6
2	[5; 6[	13	5,9
3	[6; 7[	16	7,2
4	[7; 8[	16	7,2
5	[8; 9[	21	9,5
6	[9; 10[	24	10,8
7	[10; 11[	35	15,8
8	[11; 12[	31	14,0
9	[12; 13[	19	8,6
10	[13; 14]	16	7,2
11	[14; 15[	10	4,5
12	[15; 16[	11	5,0
13	[16; 17[	0	0,0
14	[17; 18]	2	0,9

A Figura B.1 representa o histograma do número de entradas diárias de viaturas.

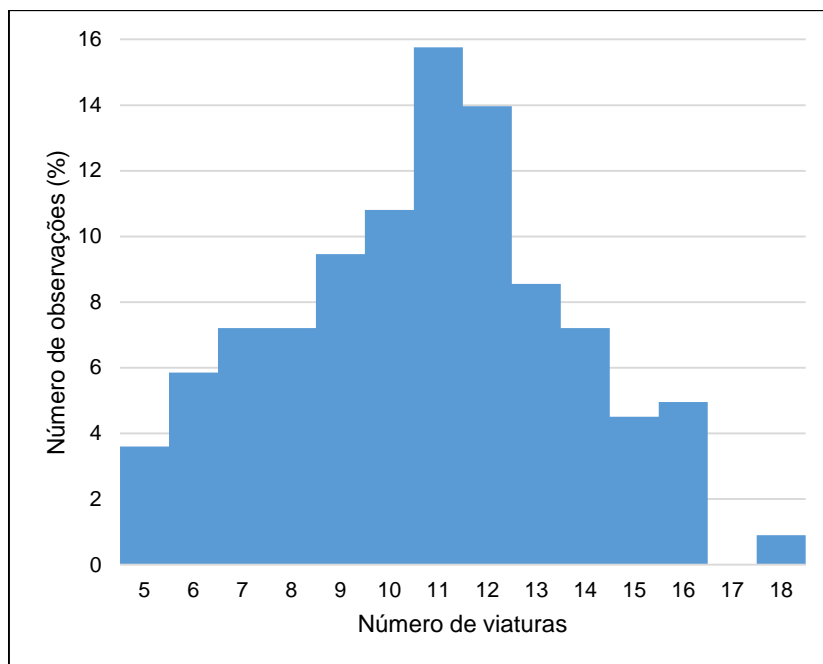


Figura B.1 - Histograma do número de entradas diárias de viaturas.

B.2. Desmontagem de duração média

A Tabela B.3 reúne os parâmetros necessários à construção do histograma para os tempos de processamento das viaturas na fase de Desmontagem de duração média (inferiores a 6,6 horas).

Tabela B.3 – Parâmetros necessários à construção do histograma para os tempos de processamento das viaturas na fase Desmontagem de duração média.

Dimensão da amostra	104
Valor máximo (horas)	6,58
Valor mínimo (horas)	0,33
Amplitude do histograma (R)	6,25
Amplitude da classe (h)	0,63
Número de classes (k)	10

A Tabela B.4 reúne o número de ordem da classe, os limites das classes, as frequências absolutas e relativas dos tempos de processamento das viaturas na fase de Desmontagem de duração média.

Tabela B.4 – Dados do histograma dos tempos de processamento das viaturas na fase de Desmontagem duração média.

Número da classe	Valores da classe (horas)	Frequência absoluta	Frequência relativa (%)
1	[0,00; 0,96[	11	10,6
2	[0,96; 1,58[	20	19,2
3	[1,58; 2,21[	15	14,4
4	[2,21; 2,83[	19	18,3
5	[2,83; 3,46[	11	10,6
6	[3,46; 4,08[	8	7,7
7	[4,08; 4,71[	4	3,8
8	[4,71; 5,33[	3	2,9
9	[5,33; 5,96[	6	5,8
10	[5,96; 6,58]	7	6,7

A Tabela B.5 reúne o sumário das várias distribuições de probabilidade por ordem crescente dos erros quadráticos dos ajustamentos entre várias distribuições de probabilidade e o conjunto dos tempos de processamento das viaturas na fase de Desmontagem de duração média.

Tabela B.5 – Sumário dos erros quadráticos do ajustamento de várias distribuições em relação aos tempos de processamento das viaturas na fase de Desmontagem de duração média.

Distribuição de probabilidade	Erro quadrático médio
Gamma	0,0066
Erlang	0,0074
Weibull	0,0078
Triangular	0,0091
LogNormal	0,0097
Beta	0,0139
Normal	0,0189
Uniforme	0.0389
Exponencial	0,0433

B.3. Desmontagem de duração longa

A Figura B.2 representa o diagrama de dispersão dos tempos de processamento das viaturas na fase de Desmontagem de duração longa (superiores a 6,6 horas).

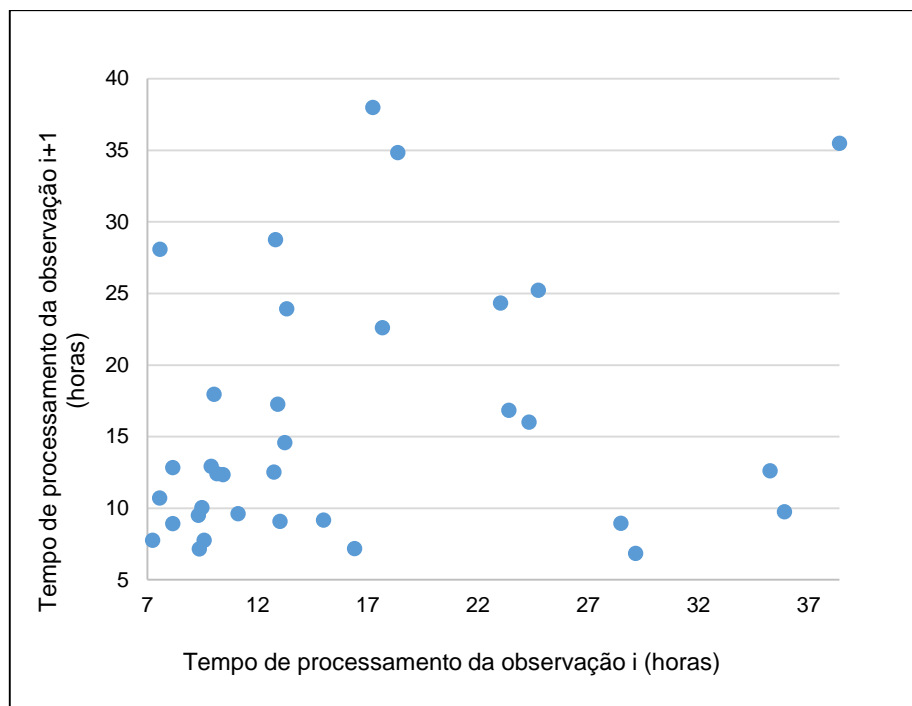


Figura B.2 - Diagrama de dispersão dos tempos de processamento das viaturas na fase de Desmontagem de duração longa.

Através da observação da Figura B.2, não é possível detetar qualquer padrão que permita aferir que existe alguma correlação entre os tempos de processamento das viaturas na fase de Desmontagem de duração longa, pelo que se conclui que existe independência entre as observações.

A Tabela B.6 reúne os parâmetros necessários à construção do histograma para os tempos de processamento das viaturas na fase de Desmontagem de duração longa.

Tabela B.6 – Parâmetros necessários à construção do histograma para os tempos de processamento das viaturas na fase Desmontagem de duração longa.

Dimensão da amostra	35
Valor máximo (horas)	38,00
Valor mínimo (horas)	6,83
Amplitude do histograma (R)	31,17
Amplitude da classe (h)	6,23
Número de classes (k)	5

A Tabela B.7 reúne o número de ordem da classe, os limites das classes, as frequências absolutas e relativas dos tempos de processamento das viaturas na fase de Desmontagem de duração longa.

Tabela B.7 – Dados do histograma para os tempos de processamento das viaturas na fase de Desmontagem de duração longa.

Número da classe	Valores da classe (horas)	Frequência absoluta	Frequência relativa (%)
1	[6,83; 13,07[	11	10,6
2	[13,07; 19,30[	20	19,2
3	[19,30; 25,53[	15	14,4
4	[25,53; 31,77[	19	18,3
5	[31,77; 38,00]	11	10,6

A Figura B.3 que representa o histograma relativo aos tempos de processamento das viaturas na fase de Desmontagem de duração longa.

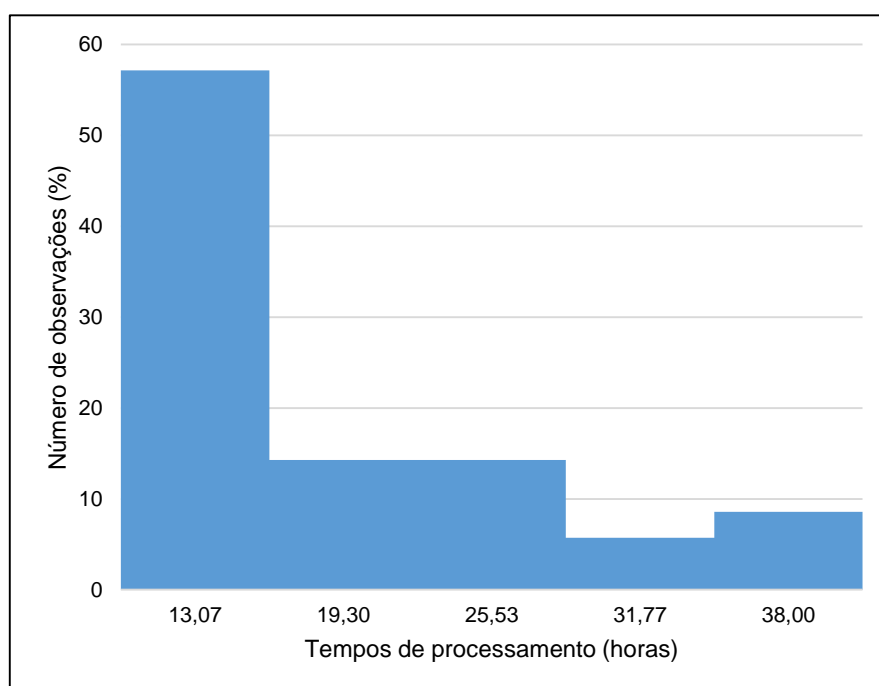


Figura B.3 – Histograma dos tempos de processamento das viaturas na fase de Desmontagem de duração longa.

A Tabela B.8 reúne o sumário das várias distribuições de probabilidade por ordem crescente dos erros quadráticos dos ajustamentos entre várias distribuições de probabilidade e o conjunto dos tempos de processamento tempos da fase de Desmontagem de duração longa.

Apesar da distribuição de probabilidade escolhida para modelar os tempos de processamento das viaturas na fase de Desmontagem de duração longa não ser a que tem menor erro quadrático médio associado, é a única cujos *p-value* dos testes do QQ e do K-S são superiores ao nível de significância $\alpha = 5\%$. As distribuições de menores erros quadráticos médios (Gamma, Weibull e Erlang) não verificam a hipótese do ajustamento dos tempos de processamento das viaturas na fase de Desmontagem de

duração longa pelo teste do QQ, pois o *p-value* correspondente das três distribuições é inferior ao nível de significância $\alpha= 5\%$. Logo, faz sentido escolher a distribuição Exponencial para modelar o conjunto dos tempos de processamento das viaturas na fase de Desmontagem de duração longa.

Tabela B.8 – Sumário dos erros quadráticos do ajustamento de várias distribuições em relação aos tempos de processamento das viaturas na fase de Desmontagem de duração longa.

Distribuição de probabilidade	Erro quadrático médio
Gamma	0,0042
Weibull	0,0042
Erlang	0,0058
Exponencial	0,0058
LogNormal	0,0076
Beta	0,0147
Triangular	0.0358
Normal	0,0642
Uniforme	0.0931

A curva da distribuição de probabilidade Exponencial e o histograma dos tempos de processamento das viaturas na fase de Desmontagem de duração longa são apresentados na Figura B.4.

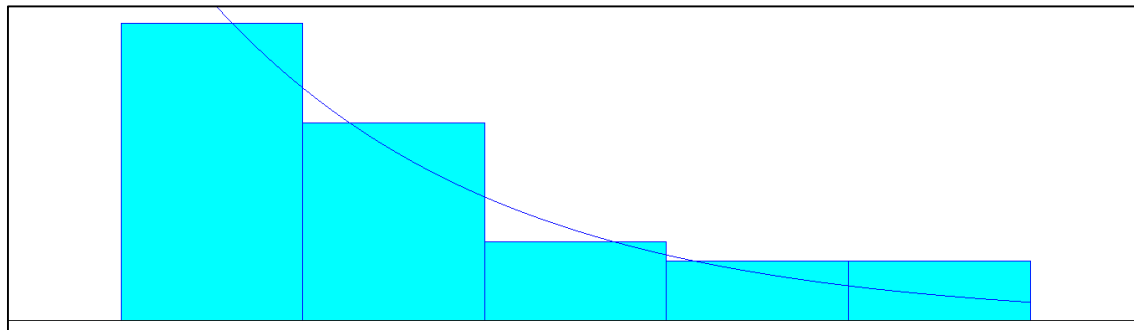


Figura B.4 – Ajustamento dos tempos de processamento das viaturas na fase de Desmontagem de duração longa à distribuição Exponencial.

A Figura B.4 sugere o ajustamento da curva da distribuição de probabilidade Exponencial ao histograma dos dados, já que não são evidenciadas grandes discrepâncias entre eles.

A Tabela B.9 contém o número de observações recolhidas na fase de Desmontagem de duração longa, a distribuição de probabilidade Exponencial e o respetivo parâmetro sugerido pelo *Input Analyzer*, o valor do erro quadrático do ajustamento e os *p-value* correspondentes às estatísticas dos testes do QQ e do K-S.

Verifica-se que os *p-value* das estatísticas dos testes do QQ e do K-S são superiores ao nível de significância (5%) o que implica a não rejeição da hipótese de os tempos de processamento das viaturas na fase de Desmontagem de duração longa serem modelados por uma distribuição de

probabilidade Exponencial de expressão $6+EXPO(10,7)$ horas, correspondendo a um erro quadrático de 0,0058.

Tabela B.9 – Informações relativas à modelação do tempo de processamento das viaturas na fase de Desmontagem de duração longa.

Número de observações	35
Expressão	$6 + Expo \sim (10,1)$
Erro quadrático do ajustamento	0,0058
<i>P-value</i> (QQ)	0,456
<i>P-value</i> (K-S)	>0,15

B.4. Preparação de Pintura

A Figura B.5 representa o diagrama de dispersão dos tempos de processamento das viaturas na fase de Preparação de Pintura.

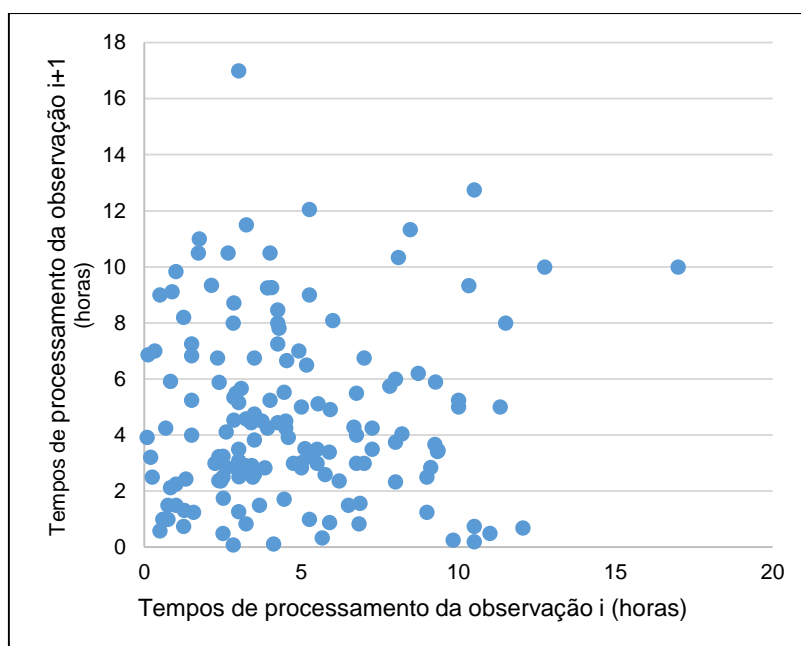


Figura B.5 – Diagrama de dispersão dos tempos de processamento das viaturas na fase de Preparação de Pintura.

Através da observação da Figura B.5, não é possível detetar qualquer padrão que permita aferir que existe alguma correlação entre os tempos de processamento das viaturas na fase de Preparação de Pintura, pelo que se conclui que existe independência entre as observações.

A Tabela B.10 reúne o número de ordem da classe, os limites das classes, as frequências absolutas e relativas dos tempos de processamento das viaturas na fase de Preparação de Pintura. Caso o número de classes fosse 12, como seria se fosse aplicada a regra da raiz quadrada para a determinação do número de classes, haveria classes sem observações. Posto isto, o número de classes foi reduzido para dez de tal forma que todas contivessem alguma observação.

Tabela B.10 – Parâmetros necessários à construção do histograma para os tempos de processamento das viaturas na fase de Preparação de Pintura.

Dimensão da amostra	148
Valor máximo (horas)	17,00
Valor mínimo (horas)	0,08
Amplitude do histograma (R)	16,92
Amplitude da classe (h)	1,69
Número de classes (k)	10

A Tabela B.11 reúne o número de ordem da classe, os limites das classes, as frequências absolutas e relativas dos tempos de processamento das viaturas na fase de Preparação de Pintura.

Tabela B.11 – Dados do histograma para os tempos de processamento das viaturas na fase Preparação de Pintura.

Número da classe	Valores da classe (horas)	Frequência absoluta	Frequência relativa (%)
1	[0; 1,78[	28	18,9
2	[1,78; 3,47[	36	24,3
3	[3,47; 5,16[	30	20,3
4	[5,16; 6,85[	21	14,2
5	[6,85; 8,54[	12	8,1
6	[8,54; 10,23[	11	7,4
7	[10,23; 11,93[	7	4,7
8	[11,93; 13,62[	2	1,4
9	[13,62; 15,31[	0	0,0
10	[15,31; 17,00]	1	0,7

A Figura B.6 ilustra o histograma dos tempos de processamento das viaturas na fase de Preparação de Pintura.

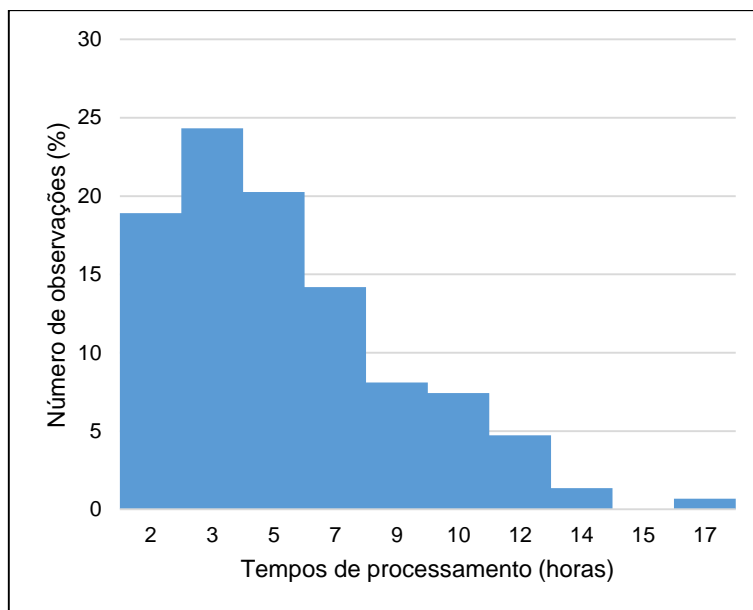


Figura B.6 – Histograma dos tempos de processamento das viaturas na fase de Preparação de Pintura.

A Tabela B.12 reúne o sumário por ordem crescente do erro quadrático dos ajustamentos entre várias distribuições de probabilidade e o conjunto dos tempos de processamento das viaturas na fase de Preparação de Pintura.

Tabela B.12 – Sumário dos erros quadráticos do ajustamento de várias distribuições em relação aos tempos de processamento das viaturas na fase de Preparação de Pintura.

Distribuição de probabilidade	Erro quadrático médio
Weibull	0,0056
Erlang	0,0064
Gamma	0,0069
Beta	0,0072
LogNormal	0,0163
Normal	0,0172
Exponencial	0,0292
Triangular	0,0332
Uniforme	0,0654

A curva da distribuição de probabilidade Weibull e o histograma dos tempos de processamento das viaturas na fase de Preparação de Pintura são apresentados na Figura B.7.

A Figura B.7 sugere um ajustamento adequado da curva da distribuição de probabilidade Weibull ao histograma dos dados, já que não são evidenciadas grandes discrepâncias entre ambos.

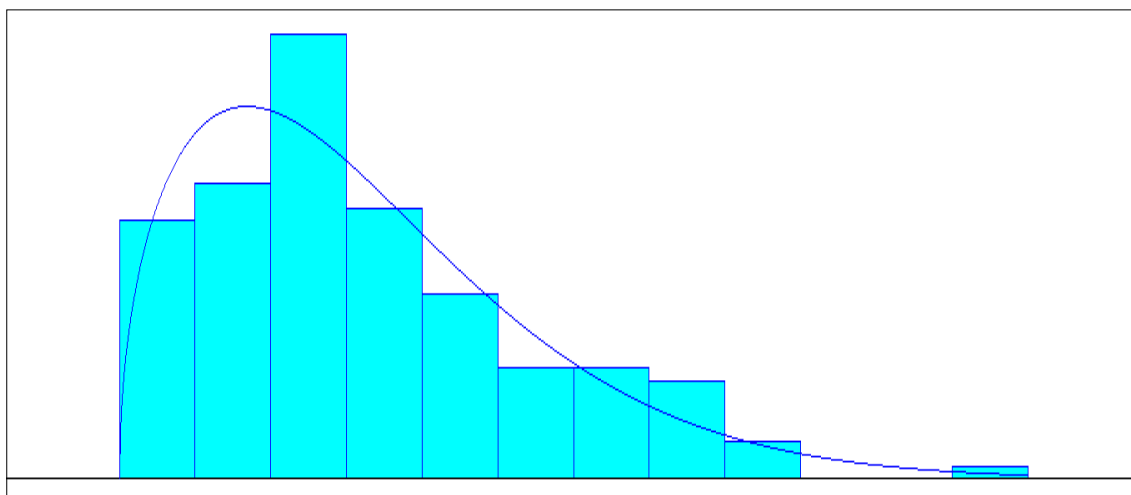


Figura B.7 – Ajustamento dos tempos de processamento das viaturas na fase de Preparação de Pintura à distribuição Weibull.

A Tabela B.13 contém o número de observações recolhidas na fase de Preparação de Pintura, a distribuição de probabilidade Weibull e os respetivos parâmetros sugeridos pelo *Input Analyzer*, o valor do erro quadrático do ajustamento e os *p-value* correspondentes às estatísticas dos testes do QQ e do K-S.

Tabela B.13 – Informações relativas à modelação do tempo de processamento das viaturas na fase de Preparação de Pintura.

Número de observações	148
Expressão	Weib ~ (5,15; 1,47)
Erro quadrático do ajustamento	0,0056
<i>P-value</i> (QQ)	0,172
<i>P-value</i> (K-S)	>0,15

Verifica-se que os *p-value* das estatísticas dos testes do QQ e do K-S são superiores ao nível de significância (5%) o que implica a não rejeição da hipótese de os tempos de processamento das viaturas na fase de Preparação de Pintura serem modelados por uma distribuição de probabilidade Weibull de parâmetros 5,15 e 1,47 horas, correspondendo a um erro quadrático de 0,0056.

B.5. Pintura

A Figura B.8 representa o diagrama de dispersão dos tempos de permanência das viaturas nas estufas na fase de Pintura.

Através da observação da Figura B.8, não é possível detetar qualquer padrão que permita aferir que existe alguma correlação entre os tempos de permanência das viaturas nas estufas na fase de Pintura, pelo que se conclui que existe independência entre as observações.

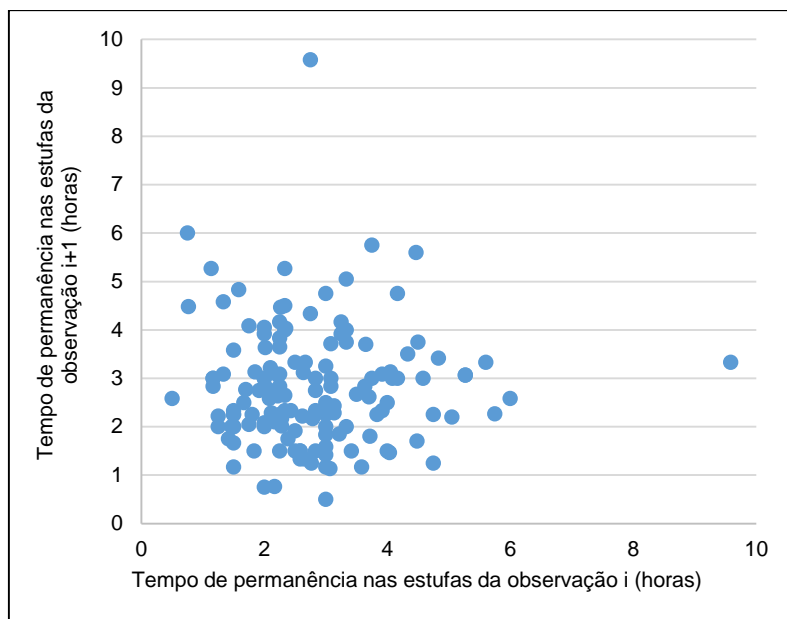


Figura B.8 – Diagrama de dispersão dos tempos de permanência das viaturas na estufa na fase de Pintura.

A Tabela B.14 reúne os parâmetros necessários à construção do histograma para os tempos de permanência das viaturas nas estufas na fase de Pintura.

Tabela B.14 – Parâmetros necessários à construção do histograma para os tempos de permanência das viaturas nas estufas na fase de Pintura.

Dimensão da amostra	143
Valor máximo (horas)	9,58
Valor mínimo (horas)	0,50
Amplitude do histograma (R)	9,08
Amplitude da classe (h)	0,83
Número de classes (k)	10

A Tabela B.15 reúne o número de ordem da classe, os limites das classes, as frequências absolutas e relativas dos tempos de permanência das viaturas nas estufas na fase de Pintura.

Tabela B.15 – Dados do histograma para os tempos de permanência das viaturas nas estufas na fase de Pintura.

Número da classe	Valores da classe (horas)	Frequência absoluta	Frequência relativa (%)
1	[0; 1,80[	26	18,1
2	[1,80; 3,10[	73	51,0
3	[3,10; 4,39[	30	21,0
4	[4,39; 5,69[	11	7,7
5	[5,69; 6,99[	2	1,4
6	[6,99; 8,29[	0	0,0
7	[8,29; 9,58[	1	0,7

A Figura B.9 ilustra o histograma dos dados relativos aos tempos de permanência das viaturas nas estufas na fase de Pintura.

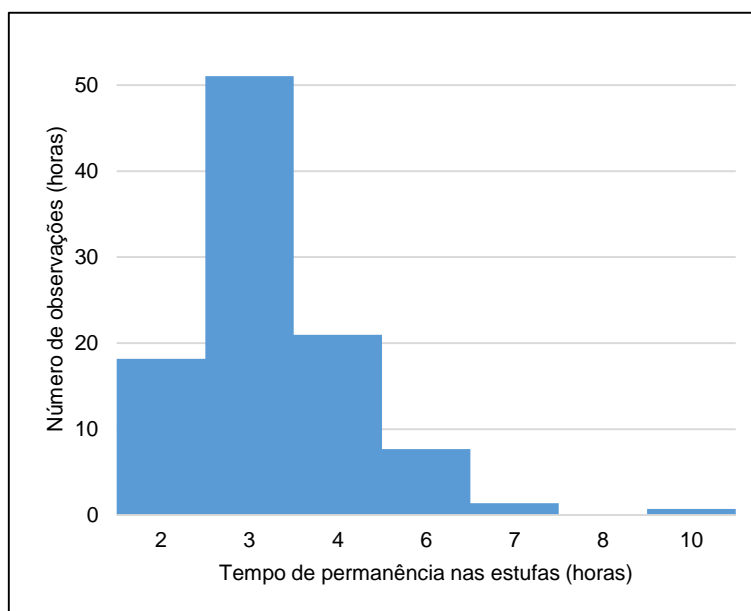


Figura B.9 – Histograma dos tempos de permanência das viaturas nas estufas na fase de Pintura.

A Tabela B.16 reúne o sumário das várias distribuições de probabilidade por ordem crescente dos erros quadráticos dos ajustamentos entre várias distribuições de probabilidade e o conjunto dos tempos de permanência das viaturas nas estufas na fase Pintura.

Tabela B.16 – Sumário dos erros quadráticos dos ajustamentos de várias distribuições aos tempos de permanência das viaturas nas estufas na fase de Pintura.

Distribuição de probabilidade	Erro quadrático médio
Erlang	0,0005
Gamma	0,0010
LogNormal	0,0036
Beta	0,0046
Weibull	0,0068
Normal	0,0080
Triangular	0,0621
Exponencial	0,1340
Uniforme	0,1420

A Figura B.10 diz respeito ao ajustamento sugerido pelo *Input Analyzer* dos tempos de permanência das viaturas nas estufas na fase de Pintura à distribuição de Erlang.

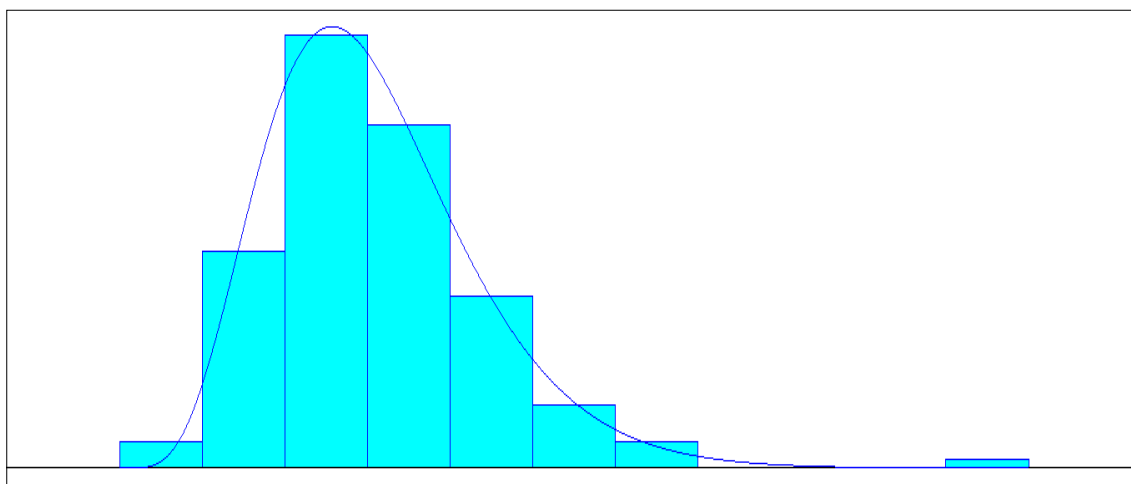


Figura B.10 – Ajustamento dos tempos de permanência das viaturas nas estufas na fase de Pintura.

A Figura B.10 sugere o ajustamento da curva da distribuição de probabilidade Erlang ao histograma dos dados, já que não são evidenciadas grandes discrepâncias entre eles.

A Tabela B.17 contém o número de observações na fase de Pintura, a distribuição de probabilidade Erlang e os respetivos parâmetros sugeridos pelo *Input Analyzer*, o valor do erro quadrático do ajustamento e os *p-value* correspondentes às estatísticas dos testes do QQ e do K-S.

Tabela B.17 – Informações relativas à modelação dos tempos de permanência das viaturas nas estufas na fase de Pintura.

Número de observações	143
Expressão	Erlang~(0,467; 6)
Erro quadrático do ajustamento	0,0005
<i>P-value</i> (QQ)	> 0,75
<i>P-value</i> (K-S)	> 0,15

Verifica-se que os *p-value* das estatísticas dos testes do QQ e do K-S são superiores ao nível de significância (5%) o que implica a não rejeição da hipótese de os tempos de permanência das viaturas nas estufas na fase de Pintura serem modelados por uma distribuição de probabilidade Erlang de parâmetros 0,467 e 6 horas, correspondendo a um erro quadrático médio de 0,0005.

B.6. Montagem

A Figura B.11 representa o diagrama de dispersão dos tempos de processamento das viaturas na fase de Montagem.

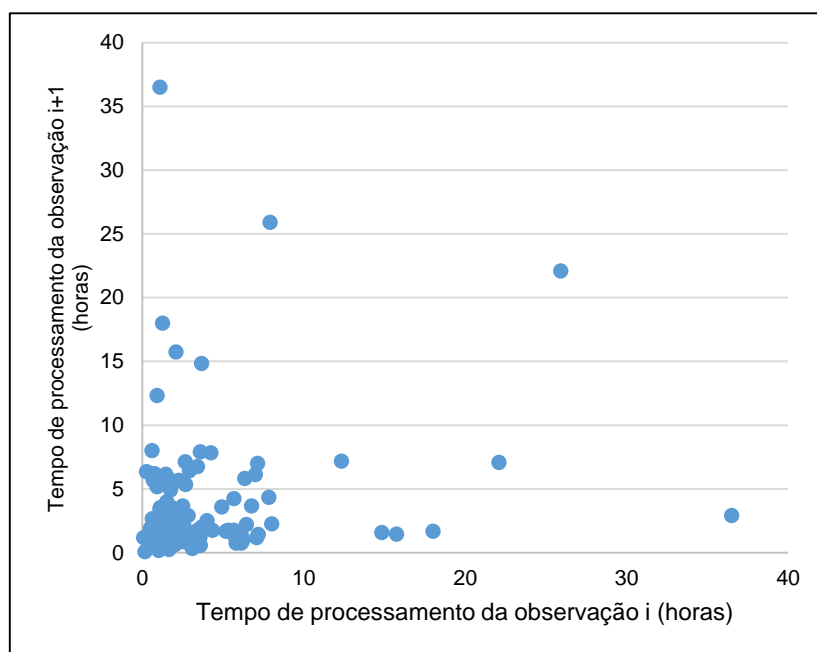


Figura B.11 – Diagrama de dispersão dos tempos de processamento das viaturas na fase de Montagem.

Através da observação da Figura B.11, não é possível detetar qualquer padrão que permita aferir que existe alguma correlação entre os tempos de processamento das viaturas na fase de Montagem, pelo que se conclui que existe independência entre as observações.

A Tabela B.18 reúne os parâmetros necessários à construção do histograma para os tempos de processamento das viaturas na fase de Montagem.

Tabela B.18 – Parâmetros necessários à construção do histograma para os tempos de processamento das viaturas na fase de Montagem.

Dimensão da amostra	129
Valor máximo (horas)	36,50
Valor mínimo (horas)	0,08
Amplitude do histograma (R)	36,42
Amplitude da classe (h)	3,31
Número de classes (k)	11

A Tabela B.19 reúne o número de ordem da classe, os limites das classes, as frequências absolutas e relativas dos tempos de processamento das viaturas na fase de Montagem.

Tabela B.19 – Dados do histograma para os tempos de processamento das viaturas na fase de Montagem.

Número da classe	Valores da classe (horas)	Frequência absoluta	Frequência relativa (%)
1	[0; 3,39[	91	70,5
2	[3,39; 6,70[	23	17,8
3	[6,70; 10,02[	8	6,2
4	[10,02; 13,33[	1	0,8
5	[13,33; 16,64[	2	1,6
6	[16,64; 19,95[	1	0,8
7	[19,95; 23,26[	1	0,8
8	[23,26; 26,57[	1	0,8
9	[26,57; 29,88[	0	0,0
10	[29,88; 33,19[	0	0,0
11	[33,19; 36,50]	1	0,8

A Figura B.12 ilustra o histograma dos dados relativos aos tempos de processamento das viaturas na fase de Montagem.

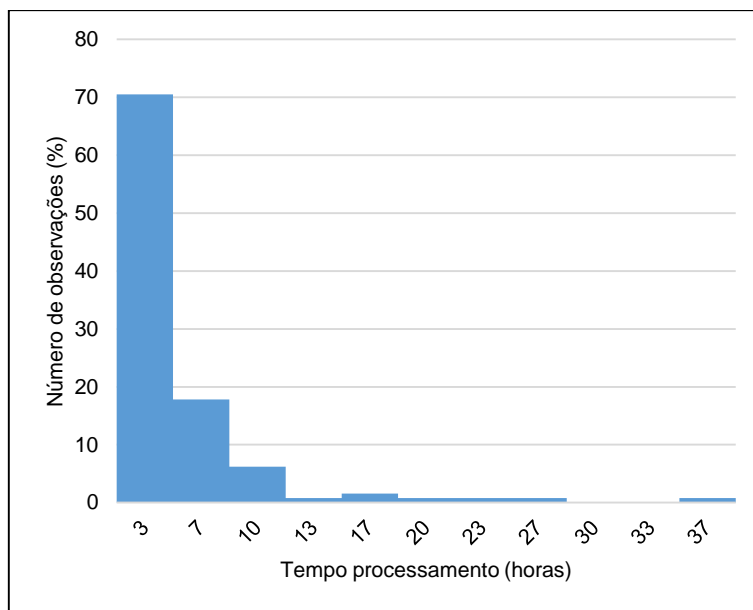


Figura B.12 – Histograma dos tempos de processamento das viaturas na fase de Montagem.

A Tabela B.20 reúne o sumário das várias distribuições de probabilidade por ordem crescente dos erros quadráticos dos ajustamentos entre várias distribuições de probabilidade e o conjunto dos tempos de processamento tempos da fase de Montagem.

Tabela B.20 – Sumário dos erros quadráticos do ajustamento de várias distribuições em relação aos tempos de processamento das viaturas na fase de Montagem.

Distribuição de probabilidade	Erro quadrático médio
LogNormal	0,0014
Weibull	0,0115
Erlang	0,0132
Exponencial	0,0132
Beta	0,0153
Gamma	0,0197
Normal	0,2270
Triangular	0,3760
Uniforme	0,4430

A Figura B.13 diz respeito ao ajustamento sugerido pelo *Input Analyzer* dos tempos de processamento da fase de Montagem à distribuição LogNormal.

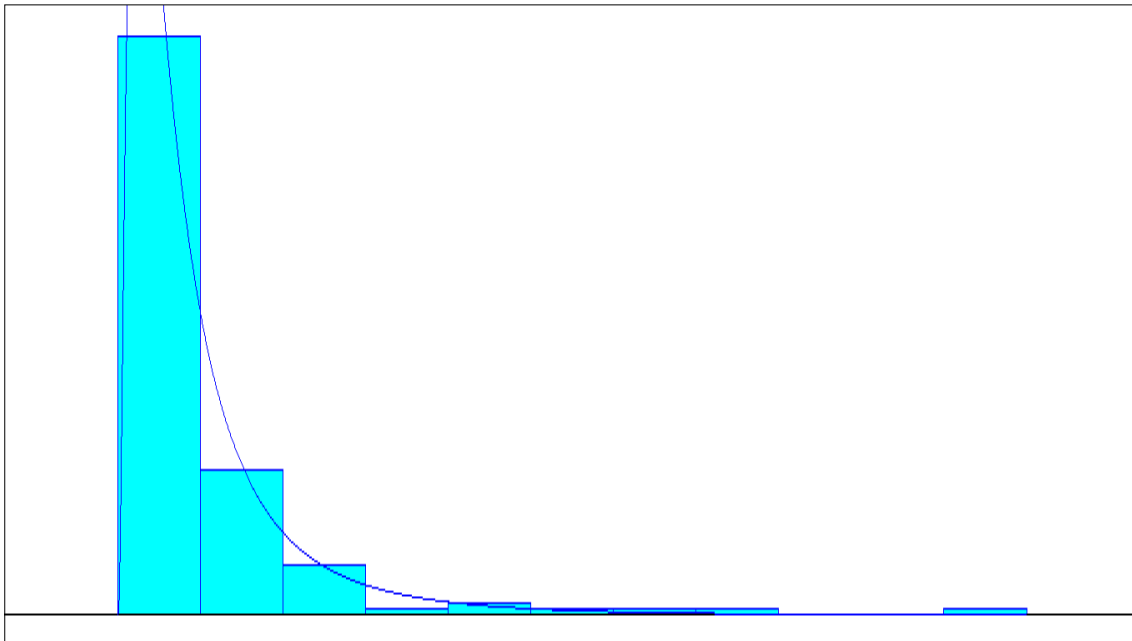


Figura B.13 – Ajustamento dos tempos de processamento das viaturas na fase de Montagem.

A Tabela B.21 contém o número de observações recolhidas na fase de Montagem, a distribuição de probabilidade LogNormal e os respetivos parâmetros sugeridos pelo *Input Analyzer*, o valor do erro quadrático do ajustamento e os *p-value* correspondentes às estatísticas dos testes do QQ e do K-S.

Tabela B.21 – Informações relativas à modelação dos tempos de processamento das viaturas na fase de Montagem.

Número de observações	129
Expressão	LogN ~ (3,37; 4,16)
Erro quadrático do ajustamento	0,0014
<i>P-value</i> (QQ)	< 0,005
<i>P-value</i> (K-S)	> 0,15

Uma vez que não existe algum ajuste que implique um *p-value* do teste do QQ e do K-S superior ao nível de significância, considera-se que a maneira mais adequada para modelar a fase de Montagem é através de uma distribuição empírica dos dados.

A Figura B.12 ilustra o aspeto da distribuição empírica dos tempos de processamento da fase de Montagem modelada pelo *Input Analyzer*.

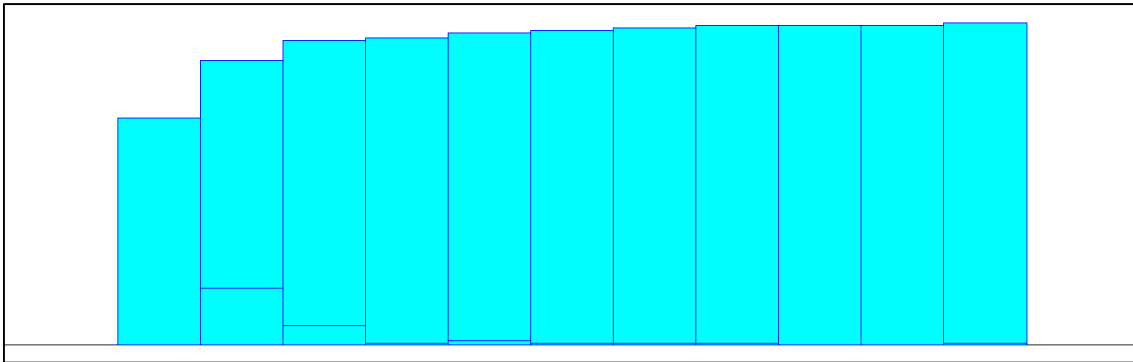


Figura B.14 – Distribuição empírica dos tempos de processamento da Montagem.

A distribuição empírica é definida por dois parâmetros: probabilidade de um dado valor pertencer a uma certa classe e o valor acumulado dessa probabilidade. A Figura B.15 ilustra a forma com o *Input Analyzer* define os parâmetros da distribuição empírica utilizada para modelar a fase de Montagem.

Distribution:	Empirical
Expression:	CONT or DISC (0.000, 0.000,
	0.705, 3.364,
	0.884, 6.727,
	0.946, 10.091,
	0.953, 13.455,
	0.969, 16.818,
	0.977, 20.182,
	0.984, 23.545,
	0.992, 26.909,
	0.992, 30.273,
	0.992, 33.636,
	0.992, 37.000)

Figura B.15 – Parâmetros da distribuição empírica.

C. Estudo de simulação e outras propostas de melhoria

C.1. Parâmetros da simulação

Para analisar a evolução temporal da medida de desempenho WIP, deve ser criada uma linha no *Data Module* de designação *Statistic* no separador *Advanced Process* da *Project bar*, tal como é possível constatar na Figura C.1.

Statistic - Advanced Process						
	Name	Type	Expression	Collection Period	Report Label	Output File
1	WIP	Time-Persistent	EntitiesWIP(Viatura)	Entire Replication	WIP	C:\Users\Francisco Freire\Desktop\wip.dat

Figura C.1 – *Data Module Statistic* para o registo dos valores do WIP ao longo do tempo de simulação nas 10 replicações.

Conforme é possível constatar pela Figura C.1, é dada uma designação (*Name*) à variável que se pretende analisar (WIP) e que é do tipo (*Type*) *Time-Persistent*, já que se pretende observar a sua evolução temporal ao longo das corridas de simulação. De seguida, deve ser definida a expressão matemática (*Expression*) em linguagem do *software* que permita determinar os valores do WIP ao longo das corridas de simulação, dada por “EntitiesWIP(Viatura)”. Definida a expressão, deve ser selecionada a hipótese *Entire Replication* na coluna correspondente ao *Collection Period*, de forma a que o valor da variável seja registado ao longo das várias corridas de simulação. A coluna correspondente ao *Report Label* serve para identificar nos relatórios gerados pelo *software* o valor das estatísticas associadas ao WIP, nomeadamente, a média, o *half width*, os valores máximo e mínimo, e as médias máxima e mínima. Por fim, basta definir um nome, seguido da extensão “.dat”, e um destino ao ficheiro (coluna *Output File*) que será criado pela corrida das 10 replicações e que servirá de *input* ao *Output Analyzer*.

Para gerar o gráfico com a evolução temporal da medida de desempenho WIP através do *Output Analyzer*, deve-se selecionar a opção *Plot* e escolher o ficheiro de extensão “.dat” criado pelo modelo, conforme ilustrado pela Figura C.2.

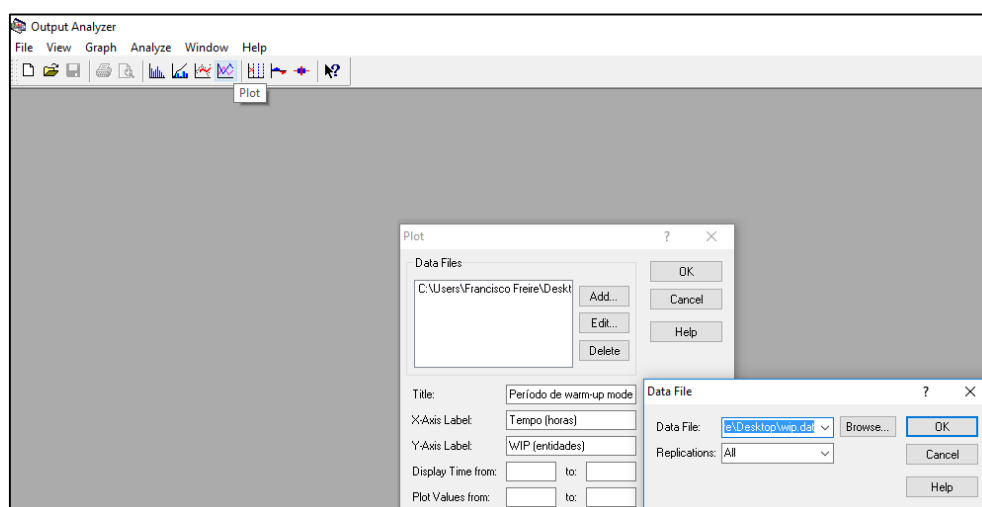


Figura C.2 – Opção *Plot* do *Output Analyzer*.

No campo *Data Files*, deve ser adicionado o ficheiro “.dat” criado pelas 10 replicações no modelo de simulação através da opção *Add*. De seguida, no menu *Data File*, deve ser seleccionada a opção *All* no campo *Replications* de forma a serem exibidas no gráfico a evolução temporal do WIP em cada replicação. Os restantes campos no menu *Plot* correspondem ao título (*Title*) do gráfico e às legendas dos eixos das abscissas e ordenadas.

A Tabela C.1 ilustra o valor médio do WIP (\overline{WIP}_i) em cada replicação i para as 10 replicações corridas.

Tabela C.1 – Valores médios do WIP para cada replicação no modelo atual.

Replicação i	\overline{WIP}_i
1	25,04
2	52,12
3	52,18
4	71,86
5	45,18
6	54,25
7	40,48
8	35,54
9	41,27
10	35,42

Com base nos valores da Tabela C.1 e com base na igualdade identificada por (2.3) no subcapítulo 2.3.7, o valor do desvio amostral é igual a 13,00 horas.

C.2. Validação do modelo de simulação

A Tabela C.2 reúne, por ordem crescente, o número de viaturas reparadas mensalmente na oficina e o número de viaturas reparadas mensalmente no modelo.

Tabela C.2 – Número de viaturas reparadas mensalmente na oficina e no modelo atual.

Número de viaturas reparadas em 20 dias úteis		
Observação	Oficina	Modelo
1	154	169
2	178	172
3	180	172
4	185	177
5	186	183
6	187	184
7	190	188
8	202	194
9	202	199
10	206	207
11	220	208

Com base no valor dos *ranks* da Tabela 5.4 no subcapítulo 5.1.3., calcula-se os valores W_i com $i = \{Oficina, Modelo\}$ em que:

$$W_{Oficina} = \sum_{i \in Oficina} Rank_i$$

$$W_{Oficina} = 1 + 5 + 6 + 9 + 10 + 11 + 13 + 16,5 + 16,5 + 17 + 20 = 125.$$

$$W_{Modelo} = \sum_{i \in Modelo} Rank_i$$

$$W_{Modelo} = 2 + 3,5 + 3,5 + 4 + 7 + 8 + 12 + 14 + 15 + 18 + 19 = 106.$$

Com base nos valores W_i , são calculados os valores U_i com $i = \{Oficina, Modelo\}$ em que:

$$U_{Oficina} = W_{Oficina} - \frac{n_{Oficina}*(n_{Oficina}+1)}{2}$$

$$U_{Oficina} = 125 - \frac{11(11+1)}{2} = 59$$

$$U_{Modelo} = W_{Modelo} - \frac{n_{Modelo}*(n_{Modelo}+1)}{2}$$

$$U_{Modelo} = 106 - \frac{11(11+1)}{2} = 40.$$

Calculados $U_{Oficina}$ e U_{Modelo} , deve ser escolhido o valor U tal que $U = \min_{i \in \{Oficina, Modelo\}} \{U_{Oficina}, U_{Modelo}\}$.

Logo, $U = U_{Modelo} = 40$.

Por fim, são calculados:

$$\bar{n} = \frac{n_{Oficina} * n_{Modelo}}{2}$$

$$\bar{n} = \frac{11 * 11}{2} = 60,5.$$

$$S = \sqrt{\frac{n_{Oficina} * n_{Modelo} * (n_{Oficina} + n_{Modelo} + 1)}{12}}$$

$$S = \sqrt{\frac{11 * 11 * (11 + 11 + 1)}{12}} = 15,23.$$

$$Z_{Teste} = \frac{U - \bar{n}}{S}$$

$$Z_{Teste} = \frac{40 - 60,5}{15,23} = -1,34.$$

Uma vez que $|z| = 1,34 < |z_{0,975}| = 1,96$, então, não é rejeitada a hipótese de as medianas das populações das amostras oficina e modelo serem estatisticamente semelhantes para um nível de significância $\alpha = 5\%$, implicando a validade do modelo.

C.3. Modelo A

Tal como para a determinação do período de *warm-up* no modelo atual, é também criada uma linha no *Statistic* para a medida de desempenho WIP que será do tipo (*Type*) *Time-Persistent*, para que seja possível observar a sua evolução a partir do gráfico gerado pelo *Output Analyzer* e, partir deste, definir um período de *warm-up*.

A Figura C.3 ilustra o gráfico da evolução temporal do WIP para 10 replicações no modelo A.

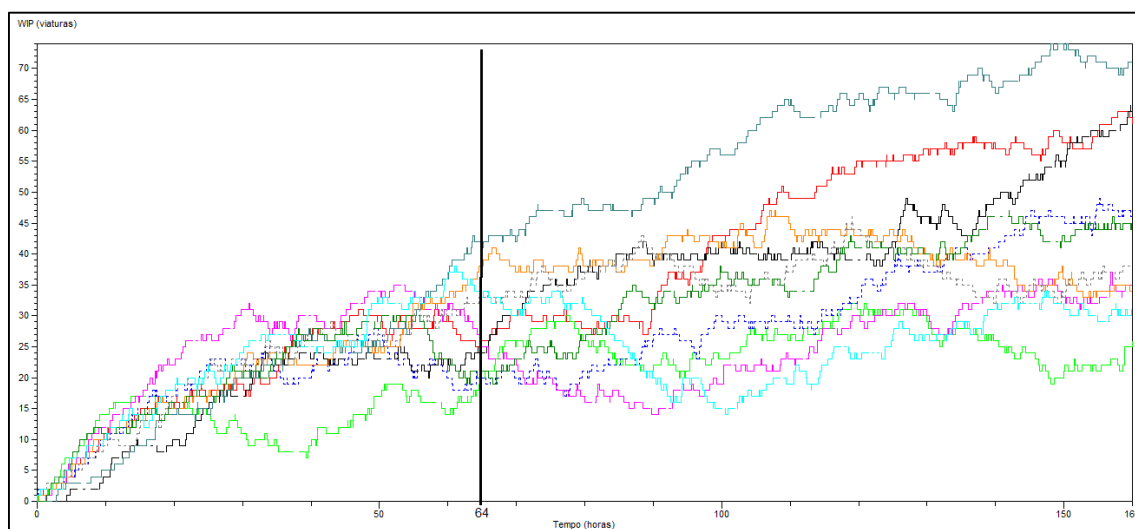


Figura C.3 – Evolução temporal do WIP no modelo A.

Assim, a partir da análise do gráfico da Figura D.1, considera-se que o período de *warm-up* para o modelo A é também de 64 horas, ou seja, 8 dias.

Para a determinação do número de replicações a correr no modelo A, deve ser incluído o período de *warm-up* na duração da corrida de simulação e devem ser corridas 10 replicações teste, tal como foi feito para o modelo atual.

A Tabela C.3 ilustra o valor médio do WIP (\overline{WIP}_i) em cada replicação i para as 10 replicações corridas no modelo A.

Tabela C.3 – Valores médios do WIP para cada replicação no modelo A.

Replicação i	\overline{WIP}_i (viaturas)
1	56,57
2	35,03
3	38,62
4	52,46
5	32,55
6	40,56
7	62,78
8	39,15
9	41,33
10	28,00

Com base nos valores da Tabela C.3 e com base na igualdade identificada por (2.3) no subcapítulo 2.3.7, o valor do desvio amostral é igual a 11,08 viaturas.

A Tabela C.4 resume os resultados obtidos pelas 10 replicações (aproximados para duas casas decimais) para a média dos valores médios da medida de desempenho WIP (\overline{WIP}), o respetivo valor do *half width* (h_0) para um nível de confiança de $1-\alpha=95\%$ e o desvio amostral (S) associado à média das médias da medida de desempenho WIP de cada replicação no modelo A.

Tabela C.4 – Sumário estatístico das dez replicações para a medida de desempenho WIP no modelo A.

WIP (viaturas)	
Valor médio (\overline{WIP})	42,70
<i>Half width</i> (h_0)	7,92
Desvio amostral (S)	11,08

Portanto, segundo a Tabela C.4, o valor médio do WIP (\overline{WIP}) das 10 replicações é de 42,70 viaturas, com um *half width* (h_0) associado de 7,92 viaturas e um desvio amostral (S) de 11,08 viaturas.

A Tabela C.5 reúne o número das replicações (R) a correr no modelo de simulação obtido através das aproximações apresentadas no subcapítulo 2.3.7. para um valor de *half width* arbitrário (h) de 4,5 horas e para uma precisão relativa de 10%, para um nível de significância $\alpha=5\%$.

Tabela C.5 – Cálculo do número de replicações a correr no modelo A.

Aproximação	Com	Número de replicações (R)
$R \cong \left(\frac{t_{1-\frac{\alpha}{2}, R-1} * S}{h} \right)^2$	$t_{0,975; 9} = 2,262$ e $h = 4,5$ horas	32
$R \cong \left(\frac{z_{1-\frac{\alpha}{2}} * S}{h} \right)^2$	$z_{0,975} = 1,960$ e $h = 4,5$ horas	24
$R \cong R_0 * \left(\frac{h_0}{h} \right)^2$	$R_0 = 10$ replicações e $h = 4,5$ horas	31
$R = \left(\frac{t_{1-\frac{\alpha}{2}, R-1} * S}{Precisão\ relativa * \overline{WIP}} \right)^2$	$t_{0,975; 9} = 2,262$ e <i>Precisão relativa</i> = 10%	35

Assim, com base nas aproximações identificadas por (2.5), (2.6) e (2.7) no subcapítulo 2.3.7., o número de replicações a correr no modelo de simulação é 32, 24 e 31, respetivamente. Analogamente, para a aproximação identificada por (2.8), com base numa precisão relativa de 10%, o número de replicações a efetuar no modelo de simulação é também 35. Como se pretende adotar uma perspetiva conservadora, deve-se optar pelo valor máximo do número de replicações obtidas pelas várias aproximações. Logo, devem ser corridas 35 replicações no modelo de simulação. Porém, uma vez que o modelo A será comparado com o modelo atual em que, no qual, devem ser corridas 43 replicações, dever-se-á optar também por correr 43 replicações no modelo A.

A Figura C.4 ilustra a linha criada no *Statistic* para o modelo atual.

Statistic - Advanced Process						
	Name	Type	Expression	Collection Pe...	Report Label	Output File
2	Tempo Valor Nao Acrescentado	Output	TAVG(Viatura.NVATime)	Entire	Tempo Valor Nao Acrescentado	C:\Users\Francisco Freire\Desktop\nva1.dat

Figura C.4 – Tempo de valor não acrescentado para o modelo atual no *Statistic*.

Tal como é possível observar na Figura C.4, a linha correspondente à média do tempo de valor não acrescentado identificada por “Tempo Valor Nao Acrescentado” (*Name*) é do tipo *Output*, pois as médias dos tempos de valor não acrescentado são calculadas no final de cada replicação, dada pela expressão “TAVG(Viatura.NVA.Time)”. Deverá ser executado o mesmo procedimento para o modelo A de modo a que os ficheiros criados pela corrida das 43 replicações, que servirão de *input* ao *Output Analyzer*, possam ser comparados por meio do intervalo para $1-\alpha$ de confiança.

A Figura C.5 ilustra o preenchimento dos campos necessários à construção do intervalo de confiança para a diferença dos valores médios dos tempos de valor não acrescentado através do *Output Analyzer*.

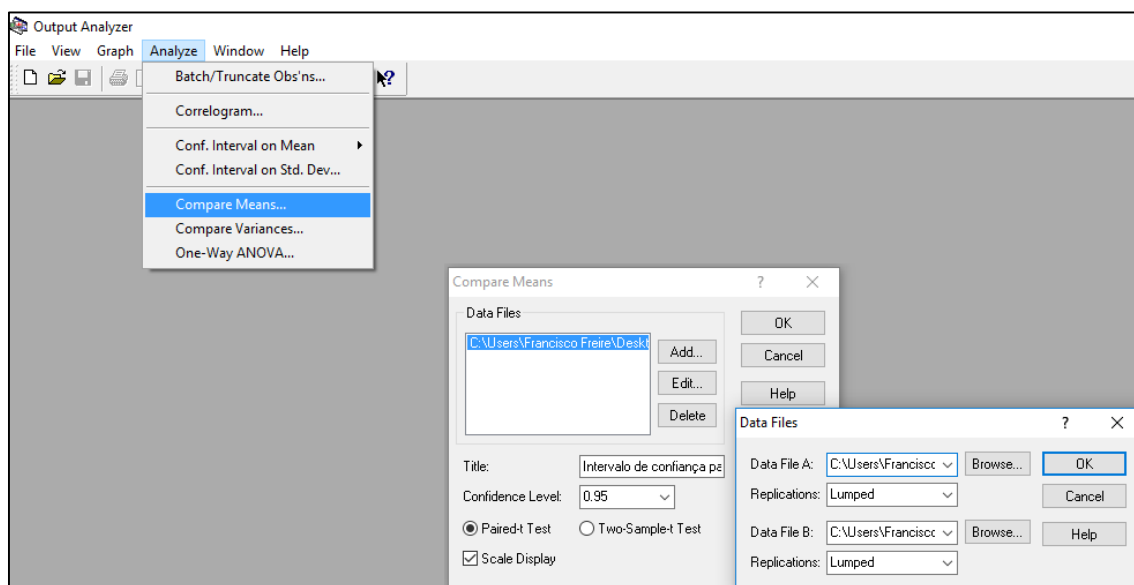


Figura C.5 – Opção *Compare Means* do *Output Analyzer*.

Assim, através do *Output Analyzer*, é definido o intervalo de confiança para $1-\alpha=95\%$ (*Confidence Level*) para diferença entre os valores médios dos tempos de valor não acrescentado para o modelo atual e para o modelo A. Note-se que, no menu *Data Files* o campo *Replications* deve ser preenchido com a opção *Lumped* de modo a que os valores das várias replicações sejam aglomerados e que seja possível fazer a análise do intervalo de confiança.

A Figura C.6 ilustra o intervalo para 95% de confiança centrado na diferença entre o valor médio do tempo de valor acrescentado de uma viatura no modelo atual e o valor médio do tempo de valor acrescentado de uma viatura no modelo A.

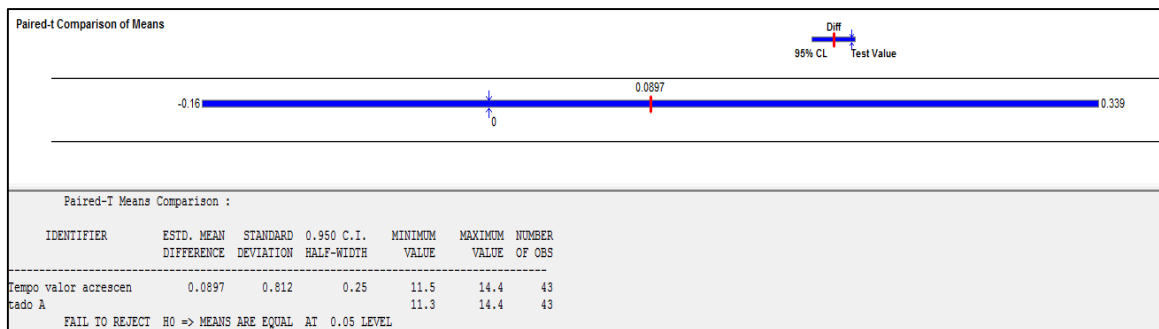


Figura C.6 –Intervalo para 95% de confiança entre a diferença dos valores médios do tempo de valor acrescentado de uma viatura no modelo atual e no modelo A.

A Figura C.7 ilustra o intervalo para 95% de confiança centrado na diferença entre o valor médio do tempo de espera de uma viatura no modelo atual e o valor médio do tempo de espera de uma viatura no modelo A.

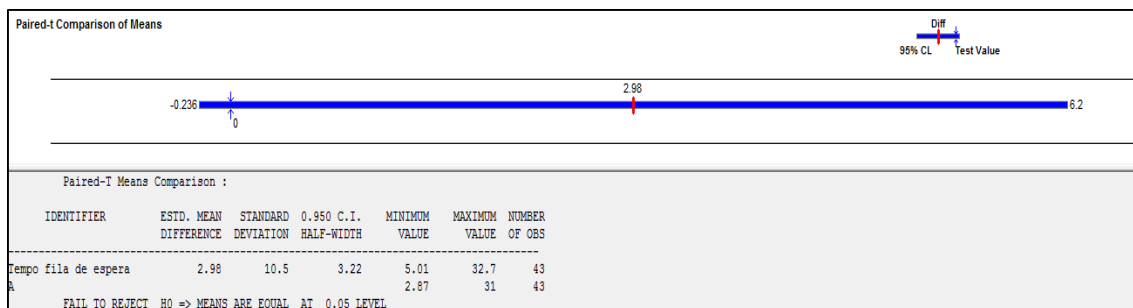


Figura C.7 – Intervalo para 95% de confiança entre a diferença dos valores médios do tempo na fila de espera de uma viatura no modelo atual e no modelo A.

A Figura C.8 ilustra o intervalo para 95% de confiança centrado na diferença entre o valor médio do tempo de permanência de uma viatura no modelo atual e o valor médio do tempo de permanência de uma viatura no modelo A.

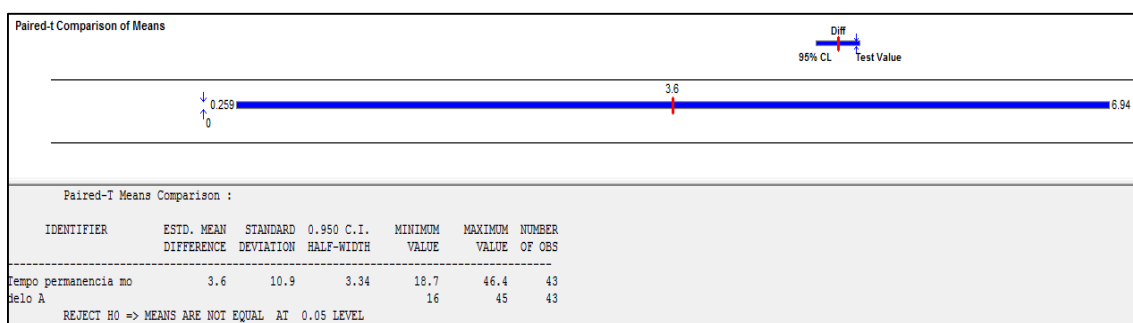


Figura C.8 – Intervalo para 95% de confiança entre a diferença dos valores médios do tempo de permanência de uma viatura no modelo atual e no modelo A.

C.4. Modelo B

A Figura C.9 ilustra o gráfico da evolução temporal do WIP para 10 replicações no modelo B.

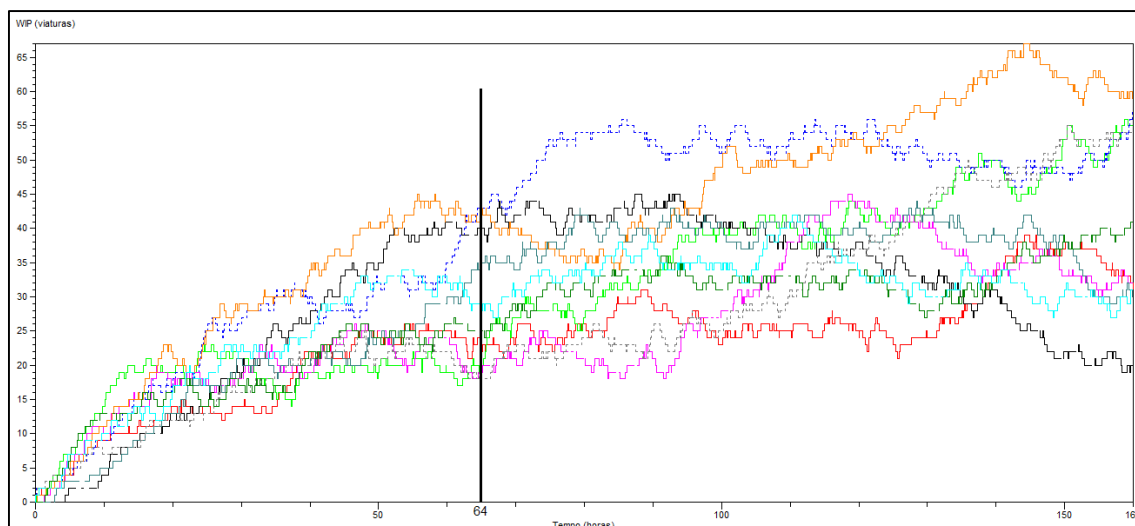


Figura C.9 – Evolução temporal do WIP no modelo B.

Assim, a partir da análise do gráfico da Figura C.7, considera-se que o período de *warm-up* para o modelo B é também de 64 horas, ou seja, 8 dias.

Para a determinação do número de replicações a correr no modelo B, deve ser incluído o período de *warm-up* na duração da corrida de simulação e devem ser corridas 10 replicações teste, tal como foi feito para o modelo atual e para o modelo A.

A Tabela C.6 ilustra o valor médio do WIP (\overline{WIP}_i) em cada replicação i para as 10 replicações corridas no modelo B.

Tabela C.6 – Valores médios do WIP para cada replicação no modelo B.

Replicação i	\overline{WIP}_i (viaturas)
1	31,90
2	47,26
3	51,31
4	32,96
5	29,79
6	50,61
7	42,71
8	43,23
9	36,70
10	34,64

Com base nos valores da Tabela C.6 e com base na igualdade identificada por (2.3) no subcapítulo 2.3.7, o valor do desvio amostral é igual a 7,96 viaturas.

A Tabela C.7 resume os resultados obtidos pelas 10 replicações (aproximados para duas casas decimais) para a média dos valores médios da medida de desempenho WIP ($\overline{\overline{WIP}}$), o respetivo valor do *half width* (h_0) para um nível de confiança de $1-\alpha = 95\%$ e o desvio amostral (S) associado à média das médias da medida de desempenho WIP de cada replicação no modelo B.

Tabela C.7 – Sumário estatístico de dez replicações para a medida de desempenho WIP no modelo B.

WIP (viaturas)	
Valor médio (\overline{WIP})	40,11
Half width (h_0)	5,69
Desvio amostral (S)	7,96

Portanto, segundo a Tabela C.7, o valor médio do WIP (\overline{WIP}) das 10 replicações é de 40,11 viaturas, com um *half width* (h_0) associado de 5,69 viaturas e um desvio amostral (S) de 7,96 viaturas.

A Tabela C.8 reúne o número das replicações a executar no modelo de simulação (R) obtido através das aproximações apresentadas no subcapítulo 2.3.7. para um valor de *half width* arbitrário (h) de 4,5 horas e para uma precisão relativa de 10%, para um nível de significância $\alpha = 5\%$.

Tabela C.8 – Cálculo do número de replicações a correr no modelo B.

Aproximação	Com	Número de replicações (R)
$R \cong \left(\frac{t_{1-\frac{\alpha}{2}, R-1} * S}{h} \right)^2$	$t_{0,975; 9} = 2,262$ e $h = 4,5$ horas	17
$R \cong \left(\frac{z_{1-\alpha/2} * S}{h} \right)^2$	$z_{0,975} = 1,960$ e $h = 4,5$ horas	13
$R \cong R_0 * \left(\frac{h_0}{h} \right)^2$	$R_0 = 10$ replicações e $h = 4,5$ horas	16
$R = \left(\frac{t_{1-\frac{\alpha}{2}, R-1} * S}{Precisão\ relativa * \overline{WIP}} \right)^2$	$t_{0,975; 9} = 2,262$ e $Precisão\ relativa = 10\%$	21

Assim, com base nas aproximações identificadas por (2.5), (2.6) e (2.7) no subcapítulo 2.3.7., o número de replicações a correr no modelo de simulação é 17, 13 e 16, respetivamente. Analogamente, para a aproximação identificada por (2.8), com base numa precisão relativa de 10%, o número de replicações a correr no modelo de simulação é também 21. Como se pretende adotar uma perspetiva conservadora, deve-se optar pelo valor máximo do número de replicações obtidas pelas várias aproximações. Logo, devem ser corridas 21 replicações no modelo de simulação. Porém, uma vez que o modelo B será comparado com o modelo atual em que, no qual, devem ser corridas 43 replicações, dever-se-á optar também por correr 43 replicações no modelo B.

A Figura C.10 ilustra o intervalo para 95% de confiança da diferença entre os valores médios do número de viaturas na fila de espera para a fase de Desmontagem de duração longa no modelo atual e no modelo B.

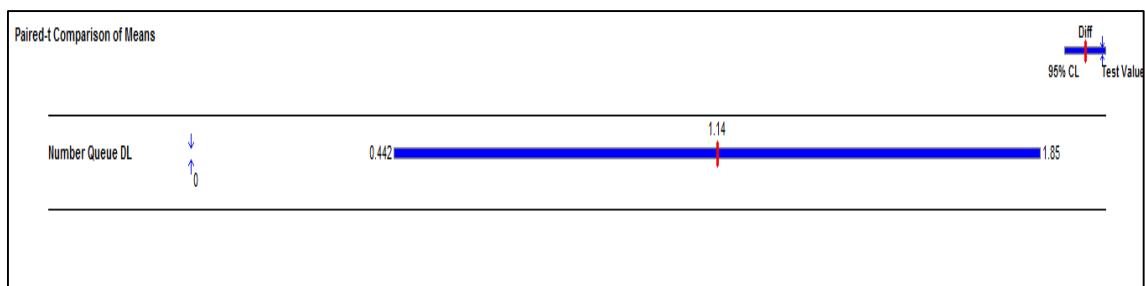


Figura C.10 – Intervalo para 95% de confiança da diferença entre os valores médios do número de viaturas na fila de espera para a fase de Desmontagem de duração longa no modelo atual e no modelo B.

A Figura C.11 ilustra o intervalo para 95% de confiança da diferença entre os valores médios do tempo de uma viatura na fila de espera para a fase de Desmontagem de duração longa no modelo atual e no modelo B.

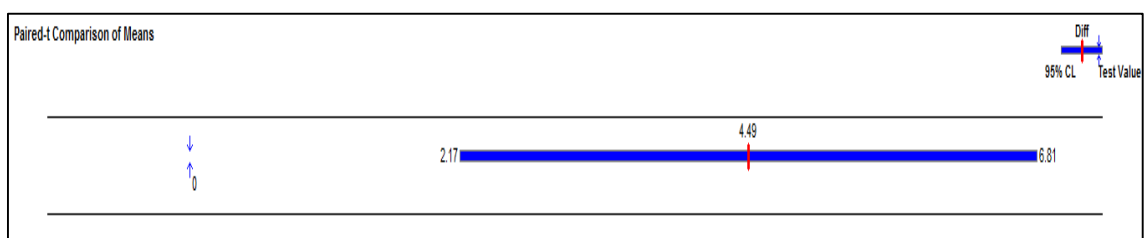


Figura C.11 – Intervalo para 95% de confiança da diferença entre os valores médios do tempo na fila de espera de uma viatura para a fase de Desmontagem de duração longa no modelo atual e no modelo B.

A Figura C.12 ilustra o intervalo para 95% de confiança da diferença entre os valores médios do número de viaturas na fila de espera para a fase de Desmontagem de duração média no modelo atual e no modelo B.

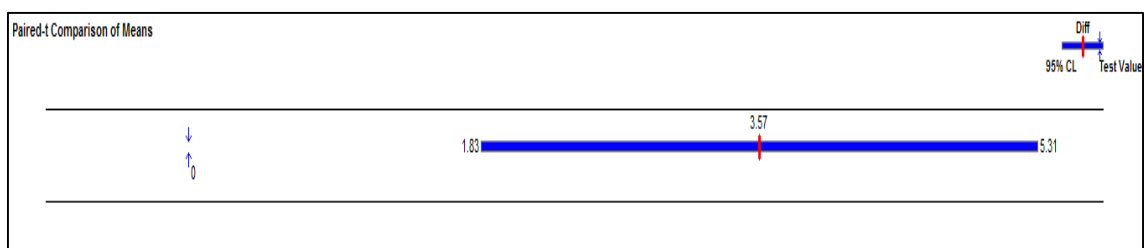


Figura C.12 – Intervalo para 95% de confiança da diferença entre os valores médios do número de viaturas na fila de espera para a fase de Desmontagem de duração média no modelo atual e no modelo B.

A Figura C.13 ilustra o intervalo para 95% de confiança da diferença entre os valores médios do tempo de uma viatura na fila de espera para a fase de Desmontagem de duração média no modelo atual e no modelo B.

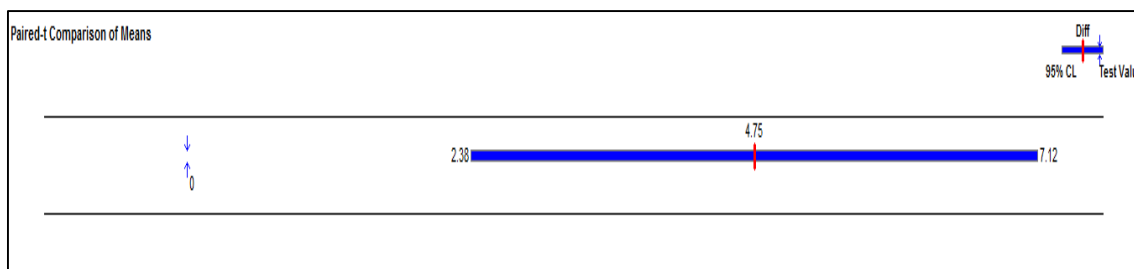


Figura C.13 – Intervalo para 95% de confiança da diferença entre os valores médios do tempo de uma viatura na fila de espera para a fase de Desmontagem de duração média no modelo atual e no modelo B.

A Figura C.14 ilustra o intervalo para 95% de confiança da diferença entre os valores médios do número de viaturas na fila de espera para a fase de Montagem no modelo atual e no modelo B.

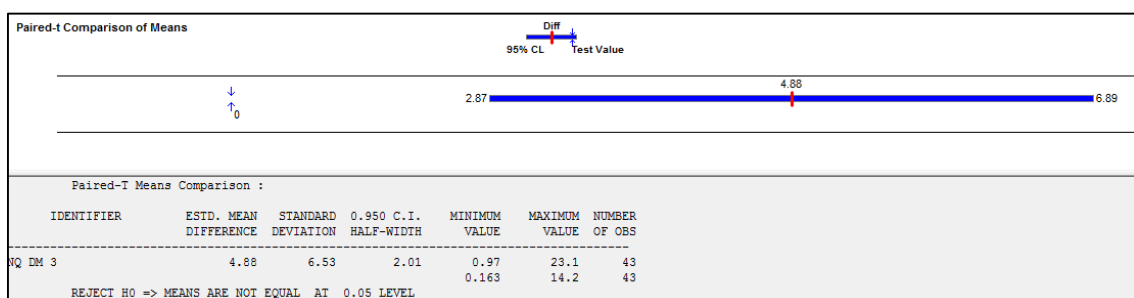


Figura C.14 – Intervalo para 95% de confiança da diferença entre os valores médios do número de viaturas na fila de espera para a fase de Montagem no modelo atual e no modelo B.

A Figura C.15 ilustra o intervalo para 95% de confiança da diferença entre os valores médios do tempo de uma viatura na fila de espera para a fase de Montagem no modelo atual e no modelo B.

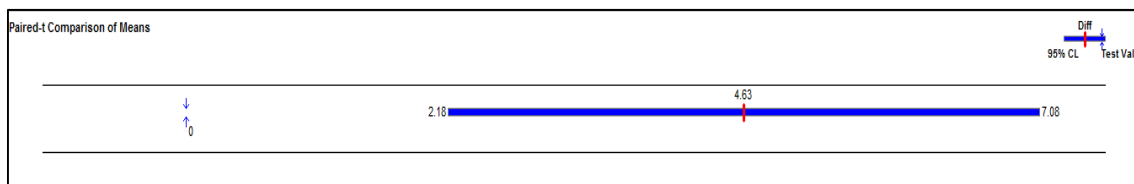


Figura C.15 – Intervalo para 95% de confiança da diferença entre os valores médios do tempo de uma viatura na fila de espera para a fase de Montagem no modelo atual e no modelo B.

A Figura C.16 ilustra o intervalo para 95% de confiança entre a diferença dos valores médios do número de viaturas reparadas no modelo atual e o modelo B.

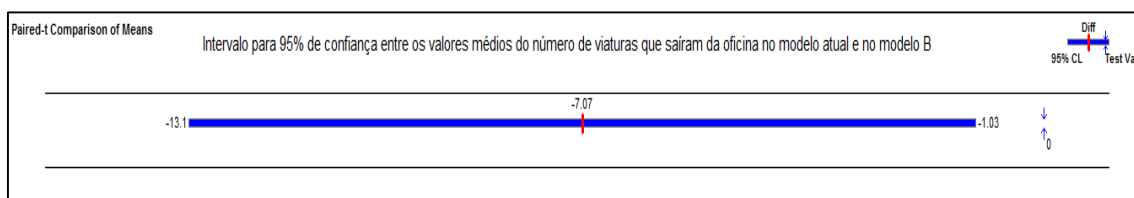


Figura C.16 – Intervalo para 95% de confiança entre a diferença dos valores médios do número de viaturas reparadas no modelo atual e no modelo B.

A Figura C.17 ilustra o intervalo para 95% de confiança da diferença entre os valores médios do tempo de valor acrescentado de uma viatura no modelo atual e no modelo B.

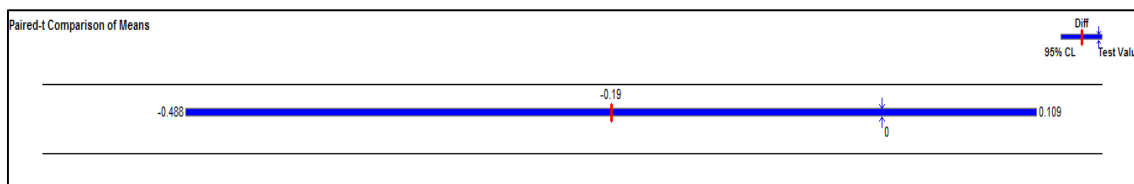


Figura C.17 – Intervalo para 95% de confiança da diferença entre os valores médios do tempo de valor acrescentado de uma viatura no modelo atual e no modelo B.

A Figura C.18 ilustra o intervalo para 95% de confiança da diferença entre os valores médios do tempo de valor não acrescentado de uma viatura no modelo atual e no modelo B.

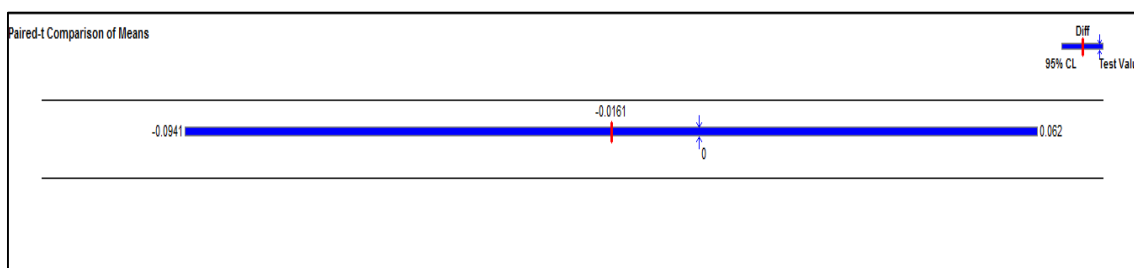


Figura C.18 – Intervalo para 95% de confiança da diferença entre os valores médios do tempo de valor não acrescentado de uma viatura no modelo atual e no modelo B.

A Figura C.19 ilustra o intervalo para 95% de confiança da diferença entre os valores médios do tempo de espera de uma viatura no modelo atual e no modelo B.

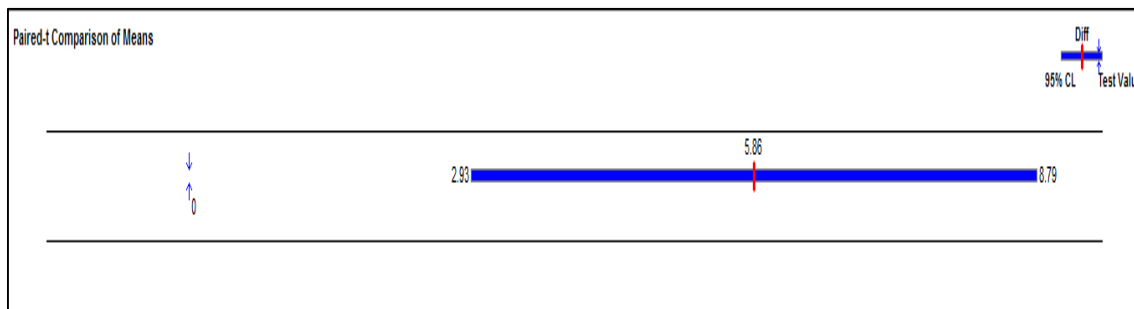


Figura C.19 – Intervalo para 95% de confiança da diferença entre os valores médios do tempo de espera de uma viatura no modelo atual e no modelo B.

A Figura C.20 ilustra o intervalo para 95% de confiança da diferença entre os valores médios do tempo de permanência de uma viatura no modelo atual e no modelo B.

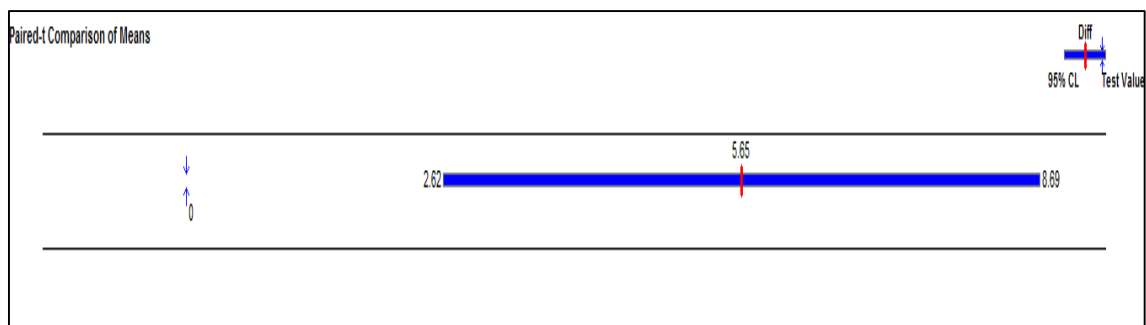


Figura C.20 – Intervalo para 95% de confiança da diferença entre os valores médios do tempo de permanência de uma viatura no modelo atual e no modelo B.